



Titre: Implantation et manutention : indicateurs de performance et relations type-forme
Title:

Auteur: Nathalie Marcoux
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Marcoux, N. (1999). Implantation et manutention : indicateurs de performance et relations type-forme [Ph.D. thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8557/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8557/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche:
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

IMPLANTATION ET MANUTENTION :
INDICATEURS DE PERFORMANCE ET
RELATIONS TYPE-FORME

NATHALIE MARCOUX
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 1999

© Nathalie Marcoux, 1999.



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-48889-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

IMPLANTATION ET MANUTENTION :
INDICATEURS DE PERFORMANCE ET
RELATIONS TYPE-FORME

présentée par : MARCOUX, Nathalie

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. MASCLE Christian, Ph.D., président

Mme RIOPEL Diane, Doctorat, codirecteur de recherche

M. LANDEVIN André, Ph.D., codirecteur de recherche

M. CORMIER Gilles, Ph.D., membre

M. ROCHETTE René, Ph.D., membre

à mon conjoint, ma flamme

Gaétan

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes directeurs, Mme Diane Riopel et M. André Langevin. Beaucoup de projets ont fait partie de mes années doctorales. Je les remercie de leur rigueur, de leur persévérance et de leur foi en mes capacités. Plusieurs opportunités d'enseignement, un stage en France, des participations à des congrès ainsi qu'une bourse d'étude m'ont permis de peaufiner mon travail de recherche et d'enrichir mes expériences professionnelles.

Je remercie MM. Laurent Villeneuve et Fred Bassal, professeurs à l'École Polytechnique de Montréal pour l'accès à une imposante banque de données d'implantations manufacturières.

Aussi, l'accueil et le suivi de M. Daniel Noyes, professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) et de son équipe m'ont permis de compléter mon enquête en entreprises.

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail de recherche, que ce soit lors de mon examen de synthèse ou lors de ma soutenance : M. Gilles Cormier, M. Christian Mascle, M. René Rochette et M. Laurent Villeneuve.

Finalement, je remercie mon conjoint pour qui encouragements, soutien psychologique, financier et technique, et sacrifices ont fait partie intégrante de sa vie durant ces dernières années. L'amitié et le support de mes parents, famille et amis m'ont aussi aidée à poursuivre et surtout compléter cette grande aventure.

Sans hésitation, il faut aller au bout de ses rêves, de ses aspirations.

RÉSUMÉ

Le problème du design d'implantation d'usine est abondamment étudié dans la littérature. Divers modèles et méthodes sont présentés dans un but de conception ou d'amélioration d'une implantation. Une hypothèse inhérente à ceux-ci est le statut actuel de l'implantation, soit un système nécessitant un nouvel aménagement ou sa révision.

Le premier objectif de notre travail de recherche est associé à l'établissement d'une méthode ayant pour but d'évaluer l'état actuel d'une implantation. Cette étape est préliminaire à l'utilisation de l'un ou l'autre des modèles ou méthodes décrits dans la littérature pour la résolution du problème d'implantation. Notre cadre de travail est un environnement dynamique de l'implantation avec une stratégie réactive. L'approche utilisée, pour l'évaluation de la fin d'une période du cycle de vie de l'implantation, implique que la durée de chaque période est de valeur inconnue a priori et que la fin d'une période est déterminée par la variation d'un critère quantitatif au-delà de la limite supérieure ou inférieure permise.

Un deuxième point peu discuté que nous abordons est la relation entre les types d'implantation, comme par produits et par procédés, et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits, comme l'épine dorsale et les formes en L ou en 8. Quelques méthodes de résolution incluent dans leur algorithme la sélection du type d'implantation ou la forme de réseau de couloirs. Cependant, la plupart font référence à un type ou une forme particulier. Ce thème est complémentaire au premier puisqu'il est nécessaire de déterminer ces deux paramètres pour la sélection de la méthode de résolution du problème d'implantation. Une enquête en entreprises nous permet d'établir les bases d'analyse de ce deuxième objectif.

Objectif 1 - Établissement d'une méthodologie d'évaluation de la performance d'une implantation

L'atteinte de cet objectif nécessite une revue de littérature sur le sujet. Contrairement aux divers recensements de modèles et de méthodes déjà publiés, la perspective d'analyse de notre revue met l'accent sur le domaine d'utilisation des modèles et des techniques de résolution pour le problème d'implantation. Plus particulièrement, les quatre thèmes considérés sont : les données initiales, les diverses caractéristiques techniques, les résultats et les tests de validation effectués.

La méthodologie proposée pour l'évaluation périodique de l'implantation implique une connaissance approfondie du système manufacturier étudié et un accès aux données de production de l'entreprise. Trois catégories la définissent : l'étude initiale, l'angle d'analyse et l'analyse. Des notions de représentativité et de spécificité sont introduites pour la sélection des éléments-types représentant le système manufacturier étudié. Les paramètres d'analyse définis dans notre méthodologie, les éléments-types et les indicateurs de performance, sont divisés en quatre classes : les produits (ou familles de produits), les équipements de production, le système de manutention, et la gestion de production. Contrairement à des indicateurs de performance de production comme la productivité, le coût de revient ou la rentabilité, les indicateurs élaborés sont dédiés à l'évaluation de la performance de l'implantation. Les équations des indicateurs sont des ratios et les évaluations temporelles sont présentées sous forme de carte de contrôle. Les indicateurs élaborés sont :

- le ratio de quantité à fabriquer
- le ratio de retours en arrière
- le ratio de procédé de fabrication
- le ratio de manutention
- le taux de fonctionnement
- le ratio d'engorgement
- le ratio de dispersion des équipements
- le ratio d'entreposage
- le ratio de distance
- le ratio de l'horaire de travail

L'identification de la fin d'une période du cycle de vie de l'implantation est donc fonction de l'évaluation d'indicateurs de performance de l'implantation. Les résultats peuvent mener à la révision partielle ou complète de l'implantation. Parallèlement à cette analyse, il est nécessaire de remettre en question, de façon périodique, l'objectif visé. En complément à la méthodologie proposée, les notions d'étalonnage concurrentiel peuvent être applicables.

Pour la validation de notre méthodologie, nous évaluons les effets de cinq scénarios associés à trois différents objectifs pour un cas de la littérature que nous avons enrichi. Les résultats démontrent que les indicateurs de performance détectent les changements apportés au système. Cependant, il est essentiel de bien définir l'objectif visé et de porter une attention particulière à la sélection des paramètres de l'étude. En effet, la capacité de détection des variations du système repose sur la définition de ces prémisses.

Un avantage de la méthodologie proposée est le suivi périodique de divers paramètres du système combiné à une anticipation de la variation des données. Cette combinaison permet, de façon proactive, de modifier l'implantation tout en permettant une bonne période d'adaptation par rapport au nouvel aménagement. Un autre avantage est l'éventail de contextes d'application, que ce soit d'une implantation générale à une implantation cellulaire, soit de la vue globale à la vue sectorielle du système manufacturier.

Objectif 2 - Recherche de liens conceptuels entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits

Tel que suggéré par Abdou et Dutta (1990), nous considérons qu'il est raisonnable de croire qu'un lien entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits peut être créé. Notre revue de littérature associée à cet objectif indique qu'aucun auteur ne présente de façon claire et concise des résultats d'observations permettant de définir la relation

TYPE-FORME. Nous effectuons donc une enquête en collaboration avec l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) et l'École Polytechnique de Montréal (Canada). Cette enquête comprend 52 entreprises québécoises et françaises dont 36 de type par processus opératoires et 10 par produits.

Basé sur les résultats d'enquête, nous avons établi certains liens TYPE-FORME. Pour les implantations par processus opératoires et par produits, près de 60 % (respectivement 21/36 et 6/10) des entreprises utilisent un réseau bouclé. Pour ce cas particulier, une forme complexe est utilisée pour toutes les entreprises de moyenne, grande et très grande taille. Une tendance est plus difficile à déterminer pour les réseaux ouverts. Les deux pôles du niveau de complexité sont employés.

Pour les entreprises par processus opératoires, nous remarquons qu'un réseau bouclé est utilisé pour les petites entreprises (pour 8/13 entreprises- 60 %) comportant de la fabrication sur mesure ou un procédé nécessitant l'isolement, celui-ci étant localisé sur l'une des arêtes extérieures de la boucle. Autrement, les formes simples de réseau de couloirs ont la faveur avec un taux d'utilisation de 80 % (4/5). Règle générale, les moyennes et grandes entreprises optent pour un réseau de couloirs bouclé, soit respectivement 58 % et 67 % de chaque sous-ensemble de notre échantillon.

Le type d'implantation par produits est généralement associé à des réseaux de formes élaborées, qu'ils soient bouclés ou ouverts. Les cas d'exception sont les systèmes de production comportant des structures de produits simples ou lorsqu'un département est associé à un produit particulier. Dans le cas des grandes et très grandes entreprises de ce type, les deux extrêmes de la palette de formes de réseau de couloirs, soit les réseaux ouverts simples et les réseaux bouclés complexes, sont utilisés. La sélection semble être basée sur les caractéristiques des produits. Pour les petites entreprises, plusieurs formes de réseau de couloirs sont utilisées sans critère particulier de sélection.

Les résultats démontrent bien la possibilité d'établir un lien entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs.

ABSTRACT

Facilities layout is still a subject of today's concern. Countless models and techniques in the literature are associated with the problem of the design and improvement of a facilities layout. All of those are based on the need of a layout revision or of a re-layout.

Our first objective is related to the establishment of a methodology for the performance evaluation of a facilities layout. This is the first step before being able to select a model or technique for the resolution of the facilities layout problem. A dynamic environment and a reactive strategy are the two basic assumptions of our research.. The evaluation of the end of a period for the facilities layout lifecycle uses the approach that the duration is unknown a priori. The variation of a parameter outside its defined boundaries is the indication of the end of a period.

For the selection of a model or method for the resolution of the facilities layout problem, another issue must be addressed. It is the possible relation between the facilities layout types (product layout, process layout, etc.), and the aisles network shapes (spine layout, "L" or "8" layout, etc.). Most methods are related to a particular facilities layout type or aisles network shape and no relations are established between the two. A survey in industries is used to establish the TYPE-SHAPE relation.

Objective 1 - Establishment of a methodology for the performance evaluation of a facilities layout

Unlike other literature reviews of models and methods for the resolution of the facilities layout problem, our review of the subject focuses on their utilization domain. Four subjects are evaluated : initial data, technical specifications, results and validation of the tests performed.

The manufacturing system has to be completely understood by the analyst before applying the method presented. An important assumption is the access to production data. Three main steps define our methodology : the initial study, the point of view of the analysis and the analysis itself.

The selection of representative elements in regard with the manufacturing system under study uses two notions : representativity and specificity. The representative elements and indicators elaborated are divided into four categories : the products (or products families), manufacturing equipments, material handling system and production management. Unlike performance indicators related to the production, such as productivity, prime cost and profitability, our indicators are related to the performance evaluation of the facilities layout. They are used for the determination of the appropriate time for the facilities layout review, and are developed as ratios and control cards to help visualize the periodic evaluation results. They are :

- a quantity ratio
- a process ratio
- an utilization rate
- an equipments dispersion ratio
- a distance ratio
- a backtracking ratio
- a material handling ratio
- a traffic ratio
- a storage ratio
- a schedule ratio

To find the end of a period of the facilities layout lifecycle, we used the periodic evaluation of those performance indicators. The results could lead to a partial or a complete re-layout. At the same time as this analysis, the objective has to be periodically reviewed. You could also add the benchmarking notion to complement our methodology.

To validate our methodology, we have added data to a case study from Mariotti (1985). This validation includes the evaluation of five scenarios for three different objectives. Results show that our performance indicators do detect changes in the system. However, it is essential to properly define the objective and select the representative elements and indicators.. The ability to detect changes in the system under study relies on the definition of these parameters.

An advantage of our methodology is the periodic follow-up of parameters combines to an anticipation of changes in the data. This combination enable us to review the facilities layout in a proactive manner. Based on this proactive strategy, it is possible to establish a period of adjustment for the use of the new facilities layout. Also, our methodology could be applied for the evaluation of an overall facilities layout or for a manufacturing area like a production department, or a cellular manufacturing environment (including at least two machines).

Objective 1 - Establishment of the relation between facilities layout types and aisles network shapes for the products flows

The main assumption for this objective is, as suggested by Abdou et Dutta (1990), the possibility to establish a TYPE-SHAPE relation. Our literature review found that none of the authors read, in a direct and precise manner, show results which link facilities layout types to aisles network shapes. We surveyed 52 French and Canadian industries, in collaboration with École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) and École Polytechnique de Montréal (Canada). The survey results include 36 process layout type and 10 product layout type industries.

Based on these results, we were able to establish some TYPE-SHAPE relations. For both layout types (process and product), almost 60 % (21/36 and 6/10 respectively) of the industries use a loop aisles network. For this particular case, complex shapes are used for all-size industries except for small-size. For open aisles network shapes, a trend is more difficult to define. Both extremes of the open aisles network complexity are used.

For industries related to a process layout type, small-size industries (8/13 – 60 %) are associated with a loop aisles network. This subset includes facilities either as a custom-made production or as a process requiring isolation which is located on the outer side of the loop. Otherwise, simple aisles network shapes are used with a distribution rate of 80 % (4/5) for our survey. Both medium- and large-size industries rely on a loop aisles network with a distribution rate of 58 % and 67 % respectively for each subset.

Product layout type is usually related to a complex aisles network, either loop or open. An exception is for production systems with a simple part mix or including production departments defined by products. For large- and extra-large-size industries of this layout type, both extremes of the aisles network shapes are used, which are simple open aisles network and complex loop aisles network. The selection seems to be based on the products characteristics. For small-size industries, different aisles network shapes are used without any apparent criteria of selection.

The survey results show that without any doubt a relation between the facilities layout types and the aisles network shapes can be established.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	xi
TABLE DES MATIÈRES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xix
LISTE DES FIGURES	xxii
LISTE DES ANNEXES	xxiv
LISTE DES SYMBOLES	xxv
CHAPITRE 1: INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Introduction	7
2.2 Méthodes exactes d'optimisation	12
2.2.1 Modèles de programmation mathématique	12
2.2.2 Modèles linéaires en nombres entiers résolus par la technique d'évaluation et de séparation progressive	14

2.3	Méthodes heuristiques	15
2.3.1	Méthode SLP de Muther	16
2.3.2	Heuristiques d'optimisation	17
	Algorithmes de recuit simulé	17
	Algorithmes de recherche tabou	19
	Algorithmes génétiques	21
2.3.3	Intelligence artificielle	23
	Systèmes experts	24
	Théorie des ensembles flous	26
2.3.4	Autres heuristiques	28
2.4	Théorie des graphes	34
2.5	Simulation et théorie des files d'attente	37
2.6	Analyse comparative	38
2.7	Conclusion	45

CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS-TYPES ASSOCIÉS AUX INDICATEURS DE PERFORMANCE DE L'IMPLANTATION..... 47

3.1	Introduction	47
3.2	Produits	49
3.3	Équipements de production	52
3.4	Système de manutention	53
3.5	Gestion de production	58
3.6	Conclusion	61

CHAPITRE 4 : INDICATEURS DE PERFORMANCE DE L'IMPLANTATION..... 63

4.1	Introduction	63
4.2	Revue de littérature	64
	Produits	70
	Équipements de production	71

Objectif 1 - De façon globale, évaluation de la variation de la structure de produits et de la constance des différents processus opératoires.....	151
Objectif 2 - Évaluation de la manutention vers l'assemblage final	157
Objectif 3 - Évaluation des bris et pannes de certains équipements de production	160
5.5 Conclusion.....	164

CHAPITRE 6 : RELATIONS ENTRE LES TYPES D'IMPLANTATION ET LES FORMES DE RÉSEAU DE COULOIRS

6.1 Introduction	167
6.2 Profil des entreprises étudiées	169
6.3 Analyse des résultats d'enquête	174
6.3.1 Analyse globale	174
6.3.2 Analyse du sous-ensemble d'entreprises de classe CTI-30	179
6.4 Conclusion.....	180

CHAPITRE 7 : CONCLUSION

7.1 Objectif 1 - Établissement d'une méthodologie d'évaluation de la performance d'une implantation	184
7.2 Objectif 2 - Recherche de liens conceptuels entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits	186
7.3 Avenues de recherche	187

RÉFÉRENCES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Objectifs principaux et complémentaires de notre travail de recherche	5
Tableau 2.1	Classification des modèles et des techniques de résolution du problème d'implantation.....	9
Tableau 2.2	Paramètres d'évaluation des modèles et des techniques de résolution du problème d'implantation	10-11
Tableau 2.3	Résumé des modèles et des techniques en fonction des paramètres étudiés	44-45
Tableau 3.1	Aspects d'analyse pour les produits.....	51
Tableau 3.2	Aspects d'analyse pour les équipements de production.....	53
Tableau 3.3	Aspects d'analyse pour le système de manutention	58
Tableau 3.4	Aspects d'analyse pour la gestion de production	61
Tableau 4.1	Critères d'évaluation périodique d'une implantation, par thèmes.....	68 à 70
Tableau 4.2	Données et résultats pour l'exemple de l'indicateur #1	79
Tableau 4.3	Paramètres de fabrication des produits pour l'indicateur #3.....	90
Tableau 4.4	Paramètres de production de fraiseuses pour l'indicateur #3	90
Tableau 4.5	Résultats de l'exemple pour l'indicateur #3.....	90
Tableau 4.6	Identification des cas permis pour l'indicateur #9	114
Tableau 4.7	Exemples d'actions à entreprendre pour des combinaisons d'indicateurs	124
Tableau 4.8	Exemples de critères à considérer pour la sélection d'indicateurs	125
Tableau 4.9	Exemples d'éléments-types et d'indicateurs de performance de l'implantation, par thèmes.....	126-127
Tableau 5.1	Types de méthodes pour le regroupement basé sur la gamme de production, Srinivasan et Narendran (1991).....	131
Tableau 5.2	Classification des modèles et des techniques de résolution du problème de regroupement	133
Tableau 5.3	Méthodologie d'évaluation périodique d'une implantation d'usine	137-138
Tableau 5.4	Catégories Étude initiale et Angle d'analyse pour le cas étudié	144-145
Tableau 5.5	Objectifs d'étude et paramètres d'analyse associés	146
Tableau 5.6	Calculs des densités référentielles, pour les segments d'allée S1 et S2	159

Tableau 6.1	Exemples de correctif pour l'évaluation de la taille d'une entreprise	171
Tableau 6.2	Répartition des entreprises étudiées selon leur taille	172
Tableau 6.3	Distribution des entreprises selon le CTI et par types d'implantation	173
Tableau A2.1	Causes de révision de l'implantation, par auteurs	211 à 213
Tableau A2.2	Mesures d'évaluation de la manutention, proposées par Jabot (1977)	213
Tableau A2.3	Critères d'évaluation d'alternatives d'aménagement de Lin et Sharp (1999a et b), par classes et thèmes	214
Tableau A2.4	Mesures d'évaluation d'alternatives d'implantation, proposées par Konz (1985)	215
Tableau A2.5	Ratios de productivité décrits par Sule (1994)	216
Tableau A5.1	Classification des techniques de résolution du problème de regroupement	224
Tableau A5.2	Modèles et méthodes basés sur la matrice de contingence machine- composant	225-226
Tableau A5.3	Modèles et méthodes de regroupement à l'aide de coefficients de similarité	227 à 229
Tableau A5.4	Modèles et méthodes de regroupement basés sur l'optimisation mathématique	230-231
Tableau A5.5	Modèles et méthodes de regroupement basés sur la théorie des graphes	232
Tableau A5.6	Modèles et méthodes de regroupement basés sur l'intelligence artificielle	233
Tableau A6.1	Renseignements complémentaires pour divers postes	243
Tableau A6.2	Tableau multi-produits de la séquence des opérations et du nombre de déplacements par jour (8 heures)	244-245
Tableau A6.3	Tableau multi-produits de la quantité fabriquée par jour (8 heures)	246-247
Tableau A6.4	Tableau multi-produits des temps unitaires d'opération (secondes par pièce intran)	248-249
Tableau A6.5	Tableau Origine-Destination de la distance (en pieds) par unité de charge manutentionnée	250
Tableau A6.6	Tableau Origine-Destination de la quantité totale d'unités de charge manutentionnées par jour (8 heures)	251
Tableau A7.1	Valeurs pour le référentiel	252-253
Tableau A7.2	Calculs des densités référentielles, par segments d'allée	253
Tableau A7.3	Valeurs des bornes inférieures et supérieures, par indicateurs	254

Tableau A7.4	Calculs et résultats pour les indicateurs sélectionnés, scénarios 1 et 2	255-256
Tableau A7.5	Calculs et résultats pour les indicateurs sélectionnés, scénarios 3, 4 et 5	257-258
Tableau A8.1	Données de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France	265 à 268
Tableau A8.2	Données de l'École Polytechnique de Montréal, Canada	269 à 272
Tableau A9.1	Données compilées pour É.N.I. et École Polytechnique de Montréal	273-274
Tableau A9.2	Tableau croisé des CTI et des types d'implantation	275
Tableau A9.3	Tableau croisé des caractéristiques et des tailles d'entreprises	276
Tableau A9.4	Nombre de caractéristiques par taille d'entreprises	276
Tableau A9.5	Formes de réseau de couloirs pour les entreprises de notre échantillon, réseaux bouclés	277-278
Tableau A9.6	Formes de réseau de couloirs pour les entreprises de notre échantillon, réseaux ouverts	279
Tableau A9.7	Formes de réseau de couloirs pour les entreprises associées au CTI-30	280

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Diverses formes primaires de réseaux de couloirs	56
Figure 3.2	Exemples de réseaux de couloirs retrouvés en entreprises	57
Figure 4.1	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #1	80
Figure 4.2	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #2	83
Figure 4.3	Schéma représentant les composants du temps machine maximal	85
Figure 4.4	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #3	92
Figure 4.5	Arbre de données pour l'ajout de 1 et 2 machines pour l'indicateur #4	95
Figure 4.6	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #4	96
Figure 4.7	Exemple d'implantation a) initiale et b) modifiée pour l'indicateur #5	99
Figure 4.8	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #5	101
Figure 4.9	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #6	104
Figure 4.10	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #7	108
Figure 4.11	Cas possibles de positionnement de machines sur un segment d'allée pour l'indicateur #8	111
Figure 4.12	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #8	112
Figure 4.13	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #9	116
Figure 4.14	Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #10	119
Figure 5.1	Niveaux d'étalonnage concurrentiel pour les processus et les mesures de performance définis par Bogan et English (1994)	142
Figure 5.2	Graphique des segments d'allée étudiés (Si) pour l'objectif 2	147
Figure 5.3	Objectif 1 - Ratios de quantité à fabriquer (IND1) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable	152
Figure 5.4	Objectif 1 - Ratios de procédé de fabrication (IND2) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable	152
Figure 5.5	Objectif 1 - Taux de fonctionnement (IND3) pour les équipements ayant au moins une valeur non négligeable	153
Figure 5.6	Objectif 1 - Ratios de distance (IND5) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable	154

Figure 5.7	Objectif 2 - Ratios d'engorgement (IND8) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable	157
Figure 5.8	Objectif 3 - Ratios de quantité à fabriquer (IND1) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable	161
Figure 5.9	Objectif 3 - Taux de fonctionnement (IND3) pour les équipements ayant au moins une valeur non négligeable	161-162
Figure 6.1	Proportion (et nombre) d'entreprises ayant divulgué les caractéristiques étudiées	171
Figure 6.2	Distribution du nombre de caractéristiques connues en fonction de la taille des entreprises	172
Figure 6.3	Exemples de descriptif de réseaux de couloirs en terme de formes d'implantation	175
Figure 6.4	Graphique des types d'implantation en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises	176
Figure 6.5	Graphique des implantations de type par produits en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises	177
Figure 6.6	Graphique des implantations de type par processus opératoires en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises	179
Figure 6.7	Graphique des types d'implantation en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises, pour les entreprises de classe CTI-30	180
Figure 6.8	Graphique des types d'implantation en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises	181
Figure A6.1	Implantation partielle et circulation des produits P10 et P10a	243
Figure A7.1	Résultats pour les indicateurs 1, Ratio de quantité à fabriquer	259
Figure A7.2	Résultats pour les indicateurs 2, Ratio de procédé de fabrication	260
Figure A7.3	Résultats pour les indicateurs 3, Taux de fonctionnement	260 à 262
Figure A7.4	Résultats pour les indicateurs 5, Ratio de distance	262
Figure A7.5	Résultats pour les indicateurs 8, Ratio d'engorgement	263

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Liste des critères de Muther (1973) pour l'évaluation de l'implantation.....	210
Annexe 2	Revue de littérature pour la révision de l'implantation	211
Annexe 3	Exemple d'une méthodologie d'évaluation de l'indicateur #6 - Ratio de retours en arrière.....	217
Annexe 4	Résumé des équations et des domaines de solutions pour les indicateurs de performance proposés	218
Annexe 5	Modèles et méthodes de la littérature associés au problème de regroupement	224
Annexe 6	Description du cas à l'étude à la section 5.4 Analyse d'un cas.....	240
Annexe 7	Résultats associés à l'analyse de la section 5.4 Analyse d'un cas.....	252
Annexe 8	Données de base relatives à l'enquête TYPE-FORME.....	264
Annexe 9	Tableaux croisés pour l'analyse des résultats de l'enquête TYPE-FORME.....	273

LISTE DES SYMBOLES

α	Un produit particulier, constante de l'équation
β	Une famille de produits particulière, constante de l'équation
χ	Une machine particulière, constante de l'équation
ε	Une catégorie particulière d'employés, constante de l'équation
θ	Un segment d'allée particulier, constante de l'équation
\cdot	Variable associée à l'implantation référentielle
#obs	Nombre d'observations instantanées effectuées au cours d'un intervalle
%Ths (m)	Pourcentage théorique de temps hors service pour l'équipement m
autre (occupé)	Espace d'entreposage non officiel des en-cours actuellement utilisé
c (i,j,k,l)	Fonction du coût multiplié par le flux associé à l'affectation des activités i et j aux sites k et l respectivement
densité* (θ)	Densité référentielle du segment d'allée θ , exprimée en terme d'unités de charge * unités de distance / unité de temps
dist (i,j)	Distance parcourue entre les machines i et j
durée (i)	Durée de la période i
D (i,j)	Distance parcourue entre les machines i et j $= \text{dist}(i,j) - \text{MIN} \{ \text{dist}(\text{Début}, j); \text{dist}(\text{Fin}, j) \} \quad \text{pour tout } i \in \theta \text{ et } j \notin \theta$ $= \text{dist}(i,j) - \text{MIN} \{ \text{dist}(i, \text{Début}); \text{dist}(i, \text{Fin}) \} \quad \text{pour tout } i \notin \theta \text{ et } j \in \theta$ $= \text{dist}(i,j) \quad \text{autrement}$
empl (x)	Nombre d'employés de production disponibles et associés au type x d'heures de travail
entrepôt*	Proportion admissible de l'espace non officiel sur l'espace officiel associée au référentiel $\in]0; 1[\quad \text{pour tous les cas A et B}$ $= 0 \quad \text{pour le cas C}$
espace (m)	Aire de travail de la machine m, un îlot secondaire de production
groupe (EP)	Aire de travail de l'îlot principal de production de machines de même type EP

n	Nombre d'activités, nombre de sites potentiels	
$nbre (EM)$	Nombre d'équipements de production de type EM	
$nbre (EP)$	Nombre d'équipements de production de type EP	
$O_{fabrication} (m, obs)$	$= 1$	Si l'équipement m à l'observation obs est en état de fonctionnement ou d'activité accessoire
	$= 0$	Sinon
$officiel^*$	Proportion admissible de l'espace d'entreposage disponible des en-cours associée au référentiel	
	$\in]0; 1[$	pour tous les cas
$officiel (occupé)$	Capacité d'entreposage officiel des en-cours actuellement utilisée	
$officiel (total)$	Capacité d'entreposage officiel des en-cours	
$O_{hs} (m, obs)$	$= 1$	Si l'équipement m à l'observation obs est hors service
	$= 0$	Sinon
$procédé (p,f,i,j)$	$= 1$	Si le produit p de la famille f nécessite la visite des machines i et j de façon consécutive
	$= 0$	Sinon
$procédé (p,f,o,m)$	$= 1$	Si, pour le produit p de la famille f , l'opération o est performée sur la machine m
	$= 0$	Sinon
P	Nombre de périodes associées au cycle de vie de l'implantation	
$Q (p,f,o,m)$	Quantité du produit p de la famille f à transformer à l'opération o sur la machine m	
$Retour^*$	Proportion des retours en arrière, pour le référentiel	
$T^* (m)$	Proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement m en fonction du temps disponible, pour le référentiel	
$T^* (EM)$	Proportion des temps de fonctionnement et accessoire des équipements de manutention de type EM en fonction du temps disponible, pour le référentiel	
$T^* (EP)$	Proportion des temps de fonctionnement et accessoire des équipements de production de type EP en fonction du temps disponible, pour le référentiel	
$T_{disp} (m)$	Temps disponible pour l'équipement m	

$T_{\text{fabrication}}(p,f,o,m)$	Somme des temps de fonctionnement et accessoire associés au produit p de la famille f pour l'opération o sur la machine m
$T_{\text{fonction}}(p,f,o,m)$	Temps de fonctionnement associé au produit p de la famille f pour l'opération o sur la machine m
$T_{\text{fonction_total}}(m)$	Somme des temps de fonctionnement pour toutes les unités de produits utilisant l'équipement m
$T_{\text{manut}}(p,f,o,m)$	Temps de manutention associé au produit p de la famille f après l'opération o par l'équipement m
$T_{\text{manut_total}}(m)$	Somme des temps de manutention de l'équipement m
$T_{\text{usage}}(p,f,o,m)$	Somme des temps de manutention et des temps accessoires (transport à vide, prise/dépose) associés au produit p de la famille f après l'opération o sur la machine m
$UC(p,f,o,m)$	Unités de charge manutentionnées pour le produit p de la famille f après l'opération o sur la machine m , par unité de temps
temps (x)	Heures de travail disponibles associées au type x d'employés
V	durée totale du cycle de vie de l'implantation
$V1$	Pour l'entreposage officiel, le ratio de la proportion actuelle en fonction de la proportion admissible du référentiel
$V2$	Pour l'entreposage non officiel, ratio de la proportion actuelle en fonction de la proportion admissible du référentiel
x	Temps régulier, partiel, supplémentaire et de sous-traitance
$x(i,k)$	<div> <div>= 1</div> <div>Si l'activité i est localisée au site k</div> </div> <div> <div>= 0</div> <div>Sinon</div> </div>

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Le problème du design d'implantation est longuement discuté dans la littérature. Divers modèles et techniques sont présentés dans un but ultime de conception ou d'amélioration d'une implantation. Une hypothèse inhérente à la plupart des modèles et des méthodes est le statut actuel de l'implantation, soit un système manufacturier nécessitant un nouvel aménagement ou une révision de l'implantation actuelle. Lin et Sharp (1999b) et Tompkins et al. (1996) discutent de différents paramètres identifiant le besoin d'une mise à jour périodique de l'implantation. D'autres auteurs comme Hassan (1994) et Konz (1985) abordent cette question. Cependant aucune procédure de suivi n'est proposée dans la littérature. Nous considérons donc ce sujet, l'établissement d'une procédure associée à la mise à jour périodique d'une implantation, comme étant la pierre angulaire de notre travail de recherche.

Toutes les méthodes d'implantation d'usine présentées dans la littérature peuvent être associées à l'une des deux catégories suivantes : les méthodes statiques et les méthodes dynamiques. Cette classification est fonction du nombre de périodes de production considérées. Nous définissons une période comme un intervalle de temps pour lequel aucun travail de conception ou d'amélioration de l'aménagement d'usine n'est effectué. Divers auteurs, tels que Rosenblatt (1986), Rosenblatt et Lee (1987), Afentakis et al. (1990), Montreuil et Venkatadri (1991), Kouvelis et al. (1992) et Urban (1993), définissent implicitement une période comme étant de durée totale fixe et connue a priori. Les durées associées aux périodes i et $i+1$ ne sont pas nécessairement équivalentes. Pour sa part, la fin du cycle de vie de l'implantation est associée à la révision complète du type d'implantation, de la forme de réseau de couloirs et autres critères sélectionnés pour satisfaire la demande de production. Le cycle de vie d'une implantation (V) est limité et donné par :

$$V = \sum_{i=1}^P \text{durée}(i) \quad \text{où } P = \text{nombre de périodes} \quad (1.1)$$

Nichol et Hollier (1983) ont défini V (la valeur du cycle de vie d'une implantation d'usine) comme étant le temps écoulé entre l'installation et le temps correspondant au moment où au moins un tiers des équipements de production sont remplacés ou repositionnés (temps 0 et temps t respectivement). De la même façon, le temps t peut être associé au moment où au moins un tiers des produits sont remplacés par de nouveaux modèles n'étant pas de la même famille de produits, ces familles étant associées à la similarité des processus de fabrication et du type de manutention utilisé. Cette définition de la durée de vie d'une implantation est basée sur une enquête faite auprès de 33 entreprises manufacturières. Basé sur cette enquête, Nichol et Hollier (1983) évaluent V à environ 3 années. Afentakis et al. (1990) font la même estimation; cependant, ils remettent en cause l'hypothèse de la division du cycle de vie par périodes de durée connue a priori. Ils proposent deux approches quant à la division du cycle de vie d'une implantation : 1) l'approche périodique et 2) l'approche associée à la structure de produits à fabriquer ("part mix"). La première approche est basée sur un réaménagement après l'écoulement de périodes de durée fixe, soit de durée (i) prédéterminée. La seconde approche implique que la variable durée (i) est de valeur inconnue a priori et que l'annonce de la fin d'une période est faite par la variation d'un critère quantitatif au-delà de la limite supérieure ou inférieure permise.

La définition d'une période étant établie, les différentes catégories peuvent être détaillées. La **philosophie statique** associée aux méthodes d'implantation d'usine est la plus couramment utilisée. En fait, tous les modèles d'optimisation d'implantation élaborés entre 1960 et 1980 sont de nature statique. Cette philosophie ne comporte qu'une seule période d'analyse. Elle est efficace pour des cas où la variation de la production reste très faible, ou lorsque les changements reliés au processus de production sont négligeables, à court et à moyen terme. Il est évident que les recherches sur la technologie de production et la mise en marché de nouveaux produits affectent les prévisions à long terme de tout type d'entreprise.

La **philosophie dynamique**, telle que définie par Rosenblatt (1986), est orientée vers l'analyse multipériode d'une implantation. Elle est applicable à une production où la variation en nombre et en type d'équipement, la variation de la structure de produits à fabriquer ou la

variation de la quantité à fabriquer est significative. L'objectif de la méthode est non seulement de minimiser les coûts de manutention mais aussi de minimiser les coûts relatifs aux divers réaménagements effectués au cours de la vie d'une implantation. Afentakis et al. (1990) sont les premiers auteurs qui ajoutent, à l'intérieur de la fonction-objectif, un coût associé à la perte de production lors d'un réaménagement. Pour certaines entreprises, ce coût peut être significatif et, à la limite, la perte de production peut être supérieure au gain envisagé par un réaménagement.

Picard et Queyranne (1981) de même que Rosenblatt (1986) sont les premiers auteurs à aborder le concept d'implantation dynamique. Les années subséquentes ont été fructueuses quant à l'élaboration de modèles d'optimisation d'implantation utilisant cette philosophie. Tous ces modèles permettent l'optimisation de la fonction-objectif d'une implantation au cours de son cycle de vie (V). Montreuil et Venkatadri (1991) présentent deux stratégies associées à la philosophie dynamique, soit la stratégie proactive et la stratégie réactive. La **stratégie proactive** évalue l'implantation finale optimale à atteindre et se base sur celle-ci pour concevoir les implantations initiale et intermédiaires. La **stratégie réactive** a comme objectif final la réalisation d'une implantation optimale dès le départ et, par la suite, d'adapter l'implantation obtenue en fonction de la demande. La majorité des modèles mathématiques proposés utilise la stratégie réactive pour l'obtention des solutions intermédiaires au cours de la durée de vie d'une implantation. Les modèles élaborés par Rosenblatt (1986), Afentakis et al. (1990), Kouvelis et Kiran (1991), Kouvelis et al. (1992) et Urban (1993) ont pour hypothèse une stratégie réactive, en opposition au modèle de Montreuil et Venkatadri (1991) qui se base sur la stratégie proactive.

Pour les deux types de stratégie, il est essentiel de bien déterminer la durée d'une période au cours de laquelle aucun travail de conception ou d'amélioration de l'implantation n'est effectué, dans le but ultime de minimiser les coûts totaux (coûts de manutention et coûts de réaménagement), et ce, pour la durée de vie d'une implantation. Comme mentionné précédemment, la plupart des auteurs présentant des méthodes de design d'implantation conviennent de façon implicite que la durée d'une période d'une implantation est limitée et connue a priori. Des auteurs tels que El-Rayah et Hollier (1970), Apple (1977), Jabot (1977), Konz (1985), Afentakis et al. (1990), Montreuil et Laforge (1992), Rembold et Tanchoco (1994),

Sule (1994), et autres discutent d'une importante question, soit la détermination du moment propice à la révision d'une implantation. Tous soulignent la nécessité d'établir des paramètres d'évaluation pour une implantation existante. Par contre, seulement certains d'entre eux se risquent à proposer des critères d'évaluation quantitatifs. Ces critères sont généralement associés à la production, et ce de façon globale sans en dégager une procédure de suivi particulière. Le chapitre 4 présente une revue de littérature sur le sujet.

Considérant, dans un contexte d'implantation dynamique, des périodes de cycle de vie d'une implantation de durée variable, le premier objectif de notre travail de recherche est l'établissement d'une méthode simple ayant pour but d'évaluer l'état actuel d'une implantation. Cette évaluation temporelle permet de déterminer le moment où il est préférable de revoir l'implantation.

Un autre point qui est très peu discuté dans la littérature et que nous abordons dans cette thèse est la relation fondamentale entre les types d'implantation, les plus connus étant par produits, par familles de produits, par procédés ou par postes fixes, et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits, soit en épine dorsale, en L, en T, en O, en 8, ou autres. Tel que suggéré par Abdou et Dutta (1990), nous considérons qu'il est raisonnable de croire qu'un lien entre les deux peut être établi. Peu d'auteurs associent aux types d'implantation, à l'aide d'une analyse des données initiales, la forme de réseau de couloirs la plus adéquate. En effet, la plupart des modèles et des méthodes retrouvés dans la littérature sont dédiés à une forme particulière d'implantation, soit par blocs ou en épine dorsale. Un cas classique est l'association implicite d'une production de sous-traitance à une implantation de type par procédés où, de façon généralisée, les retours en arrière sont fréquents. Les couloirs empruntés pour les déplacements jouent donc un rôle important dans l'optimisation des coûts de la manutention. Les modèles de circulation de produits associés au positionnement des couloirs, telles que l'épine dorsale et ses dérivés, influencent la qualité des résultats obtenus, ces résultats étant fonction de la minimisation des coûts totaux. Ainsi, le second objectif de notre travail de recherche est une étude en entreprises permettant la détermination de la relation entre le type d'implantation préconisé et la forme de réseau de couloirs de circulation actuellement utilisée.

Les différents objectifs de notre travail de recherche sont résumés au tableau 1.1. En premier lieu, une revue de littérature concernant les modèles et les techniques d'implantation d'usine élaborés au fil des années est présentée au second chapitre. Contrairement aux divers recensements de modèles et de méthodes déjà publiées, la perspective d'analyse est différente. Cette revue de littérature met l'accent sur le domaine d'utilisation des modèles et des méthodes de design d'implantation d'usine. L'analyse effectuée est principalement axée sur : les données initiales nécessaires, les différentes caractéristiques d'une classe de modèles et de méthodes, les particularités des résultats et les tests effectués à titre d'évaluation des modèles et des méthodes.

Tableau 1.1 Objectifs principaux et complémentaires de notre travail de recherche

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1) Établissement d'une méthodologie d'évaluation de la performance d'une implantation <ol style="list-style-type: none"> i) Proposition de critères de sélection des éléments-types du système étudié ii) Définition d'indicateurs de performance iii) Analyse de l'applicabilité de la méthode proposée à l'aide d'un cas de littérature 2) Recherche de liens conceptuels entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits |
|---|

L'application des indicateurs de performance que nous proposons nécessite, au préalable, la sélection des éléments représentatifs de la production. Nous regroupons ces éléments en quatre thèmes : les produits ou familles de produits, les équipements de production, le système de manutention, et la gestion de production. Le troisième chapitre inclut des critères de sélection des éléments-types représentant le système manufacturier. Par la suite, le chapitre 4 comporte les indicateurs de performance élaborés. Nous les regroupons en fonction des quatre thèmes définis au chapitre précédent. Le cinquième chapitre présente la méthodologie proposée d'évaluation périodique d'une implantation d'usine. Un cas de la littérature, que nous avons enrichi, est utilisé à titre d'exemple d'application de la méthodologie. Nous établissons, au chapitre 6, les liens conceptuels entre les types d'implantation et les réseaux de couloirs de circulation de produits. Les résultats obtenus sont un premier pas dans cette nouvelle direction de recherche. En effet, jusqu'à maintenant, aucun auteur ne présente de résultats d'observations permettant de définir cette relation. Notre analyse est basée sur des données tirées de la littérature et de rapports

complétés dans le cadre de stages en entreprise, intégrés au programme scolaire de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) et de l'École Polytechnique de Montréal (Canada).

Finalement, une conclusion est présentée au chapitre 7. Nos propositions y sont revues et diverses avenues de recherche sont énumérées.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est la présentation et l'analyse de divers modèles mathématiques et de techniques pour les problèmes d'implantation où la manutention est un critère important. Cette analyse est l'étape préliminaire à l'atteinte des deux principaux objectifs de ce travail de recherche : la détermination d'indicateurs de performance d'une implantation et l'établissement de liens conceptuels entre les types d'implantation et les réseaux de couloirs de circulation. Comme établi par Levary et Kalchik (1985), l'analyse des différents modèles et méthodes ne doit pas se limiter aux coûts de manutention, au temps d'exécution ou au degré de précision par rapport à la solution optimale. Ainsi, notre revue de littérature est axée sur 4 thèmes d'analyse : les **données initiales**, les **diverses caractéristiques techniques** des modèles et des méthodes de résolution, les **résultats** et les **tests de validation** effectués. Il est important de souligner que certaines caractéristiques des modèles et des méthodes ne sont pas évaluées, par exemple le degré de complexité, le temps d'exécution ("CPU time") ou la précision des résultats par rapport à l'optimal. En effet, l'objectif de ce chapitre est l'évaluation de divers modèles et méthodes présentés dans la littérature, et ce du point de vue du génie industriel, c'est-à-dire applicable à la réalité en industries. Aussi, la description détaillée de l'un ou l'autre des modèles ou méthodes évalués n'est pas l'aspect dominant de notre revue de littérature mais bien leur applicabilité à un problème d'implantation d'usine et les résultats obtenus. Dans le cas de modèles ou méthodes qui sont des variantes de travaux antérieurs, seules les caractéristiques modifiées sont discutées.

Le design d'implantation d'usine est un vieux problème qui est toujours d'actualité. Les pionniers, tels que Immer (1953), Moore (1962), Apple (1963), Nadler (1967) et Reed (1967) ont tenté d'établir une méthodologie d'analyse pour la recherche de meilleures solutions d'implantation. La technique SLP ("Systematic Layout Planning") de Muther (1973) est le résultat de ces diverses années de recherche. Entre les années 1960 et 1980, la programmation mathématique fut

grandement appliquée à la génération de solutions optimales. Des méthodes heuristiques informatisées ont aussi vu le jour dans le but d'aider l'ingénieur industriel dans la conception ou l'amélioration d'implantation d'usine.

Ce n'est qu'au début des années 1980 que la recherche de méthodes exactes d'optimisation ou heuristiques pour le problème d'implantation d'usine s'oriente vers de nouvelles avenues. En effet, des méthodes basées sur la simulation, la théorie des graphes, l'intelligence artificielle et autres sont proposées. Chacune de ces avenues de recherche a une différente approche quant à la résolution du problème d'implantation.

Le modèle mathématique le plus couramment associé au problème d'implantation d'usine est le problème d'affectation quadratique (PAQ). Ce problème consiste à l'affectation de n activités à n sites potentiels dans le but d'optimiser une fonction-objectif telle que la minimisation du coût global de transfert, ou de la distance totale parcourue, ou la maximisation des liens de proximité, ou d'autres. Urban (1987) définit le problème d'affectation quadratique comme suit :

$$\text{MIN} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n c(i, j, k, l) * x(i, k) * x(j, l) \quad (2.1)$$

où $c(i, j, k, l)$: fonction du coût multiplié par le flux associé à l'affectation des activités i et j aux sites k et l respectivement

$x(i, k)$ = 1 Si l'activité i est localisée au site k
 = 0 Sinon

n : nombre d'activités, nombre de sites potentiels

Le PAQ est un problème de complexité non polynomiale. La résolution optimale du PAQ, basée sur les modèles inclus dans la littérature, est possible pour des problèmes de petite taille. Ketcham (1992) a résolu optimalement un problème de type PAQ ayant 20 activités à l'aide de la technique d'évaluation et de séparation progressive ("branch and bound"). Pour leur part, Christofides et Benavent (1989) ont solutionné optimalement un problème comptant 25 départements, mais celui-ci comporte moins de contraintes que le problème de Ketcham (1992).

Kusiak et Heragu (1987) ont déterminé 4 catégories permettant de classifier les algorithmes présentés dans la littérature : les méthodes de construction, d'amélioration, hybrides et associées à la théorie des graphes. De la même façon, Rao et Rakshit (1991), et plus récemment Delmaire et al. (1995b), ont établi diverses catégories à l'intérieur desquelles la plupart des modèles et des techniques élaborés jusqu'à ce jour peuvent être classifiés. En se basant sur ces travaux, une classification est proposée au tableau 2.1, permettant le regroupement de techniques telles que la simulation, la théorie des files d'attente ainsi que de nouvelles heuristiques d'implantation. La classification est établie en fonction de la procédure de résolution utilisée.

Tableau 2.1 Classification des modèles et des techniques de résolution du problème d'implantation

1- Méthodes exactes d'optimisation
1.1- Modèles de programmation mathématique
1.2- Modèles linéaires en nombres entiers résolus par la technique d'évaluation et de séparation progressive
2- Méthodes heuristiques
2.1- Méthode SLP de Muther
2.2- Heuristiques d'optimisation
i) Algorithmes de recuit simulé
ii) Algorithmes de recherche tabou
iii) Algorithmes génétiques
2.3- Intelligence artificielle
i) Systèmes experts
ii) Théorie des ensembles flous
2.4- Autres heuristiques
3- Théorie des graphes
4- Simulation et théorie des files d'attente

La majorité des modèles et des méthodes est basée sur le concept d'implantation par blocs ("block layout") tel que défini par Muther (1973). Ce type d'implantation ne permet pas la génération d'une solution finale sans la révision des résultats de la part de l'ingénieur industriel. En effet, certaines contraintes relatives au problème particulier (la circulation dans les couloirs par

exemple) doivent être prises en compte lors des modifications manuelles du design d'implantation. Aussi, en fonction de la méthode utilisée, il existe d'autres restrictions nécessitant une révision manuelle telles que le type d'implantation, l'orientation de la circulation, la forme du bâtiment et des divers départements, l'utilisation de postes d'entrée/sortie, et autres. Dans un but d'uniformisation de l'analyse des diverses classes de modèles et de méthodes, des paramètres d'évaluation sont proposés. Ces paramètres, présentés au tableau 2.2, caractérisent les problèmes résolus ainsi que la méthode utilisée. Ils mettent l'accent sur le **domaine d'utilisation** des modèles et des méthodes de design d'implantation d'usine.

Tableau 2.2 Paramètres d'évaluation des modèles et des techniques de résolution du problème d'implantation

<p>1) Données initiales</p> <ul style="list-style-type: none"> i) données déterministes vs stochastiques; ii) données quantitatives vs qualitatives; iii) liens interdépartementaux non orientés vs orientés; iv) dimensions unitaires vs périmètre fixe vs périmètre variable; v) possibilité de restriction de localisation d'un département; vi) possibilité d'orientation particulière d'un département; vii) implantation à 1 étage vs multiétage; viii) couloirs prédéterminés.
<p>2) Caractéristiques des algorithmes utilisés</p> <ul style="list-style-type: none"> i) algorithme de construction vs d'amélioration; ii) nature statique vs dynamique; iii) implantation par blocs vs à épine dorsale vs autres; iv) possibilité du choix de l'équipement de manutention; v) distances euclidiennes vs rectilinéaires vs réelles; vi) distance centroïde à centroïde vs autres.
<p>3) Résultats</p> <ul style="list-style-type: none"> i) nombre de solutions générées vs optimalité; ii) bâtiment de forme irrégulière vs régulière; iii) départements de forme irrégulière vs régulière; iv) implantation avec couloirs vs sans couloir; v) localisation des postes d'entrée/sortie.

**Tableau 2.2 Paramètres d'évaluation des modèles et des techniques
de résolution du problème d'implantation (suite)**

- | |
|--|
| <p>4) Tests de validation</p> <ul style="list-style-type: none"> i) données générées; ii) problèmes classiques; iii) autres auteurs. |
|--|

La première catégorie de paramètres d'évaluation, **Données initiales**, se rattache à toutes les informations nécessaires à la génération de solutions à l'aide d'un algorithme particulier. La seconde catégorie, **Caractéristiques des algorithmes utilisés**, est relative au traitement des données et aux restrictions applicables. La troisième catégorie, **Résultats**, est associée aux critères les plus couramment utilisés lors de l'évaluation d'un modèle ou méthode pour le problème d'implantation. Finalement, la quatrième catégorie, **Tests de validation**, traite des différents tests effectués pour l'évaluation des modèles ou méthodes proposés par les auteurs. Règle générale, les problèmes-types sont tirés de la littérature et sont parfois modifiés pour satisfaire les contraintes associées au modèle ou à la méthode. Les problèmes-types auxquels une grande partie des auteurs se réfèrent sont, sans contredit, ceux élaborés par Nugent et al. (1968). Ces problèmes-types consistent en des tableaux Origine-Destination de type intensité de circulation. Les dimensions des départements associées à tous ces tests sont unitaires et le nombre de départements varie entre 5 et 30. Certains autres problèmes-types sont fréquemment utilisés dans la littérature, soit ceux de Hillier (1963), Bazaraa (1975), Rosenblatt (1979), Dutta et Sahu (1982), Fortenberry et Cox (1985), Malakooti et D'Souza (1987), Golany et Rosenblatt (1989) et Skorin-Kapov (1990). Aussi, certains auteurs utilisent des problèmes-types qui leur sont propres. Ceux-ci peuvent provenir d'une génération aléatoire de données initiales ou, plus simplement, de données tirées d'un cas réel, ce qui est malheureusement rare.

En regard de la classification des modèles et des techniques de résolution du problème d'implantation proposée au tableau 2.1, une revue des modèles et des méthodes de conception ou d'amélioration d'implantation est faite en fonction des paramètres d'analyse du tableau 2.2. Par la suite, un tableau croisé résume de façon globale toutes les caractéristiques des modèles et des

méthodes étudiés. Une analyse comparative des différentes classes de modèles et de méthodes est réalisée dans le but d'établir les tendances générales des domaines d'application des divers modèles et méthodes présentés dans la littérature.

2.2 Méthodes exactes d'optimisation

Les méthodes exactes d'optimisation qui se retrouvent dans cette catégorie sont associées à la programmation linéaire en nombres entiers ou mixte en nombres entiers. Une méthode permettant la résolution de modèles de programmation en nombres entiers est la technique d'évaluation et de séparation progressive ("branch & bound"). Cette technique est évaluée plus en détail puisqu'elle est couramment utilisée pour le problème d'implantation d'usine.

Les données initiales nécessaires à l'utilisation de ces modèles et de ces méthodes sont les relations quantitatives associées aux paires d'activités. Les résultats obtenus sont toujours optimaux et les modèles utilisés ne génèrent qu'une seule implantation. Celle-ci est généralement de type par blocs ou, plus récemment, du type épine dorsale.

2.2.1 Modèles de programmation mathématique

La particularité de ce type de modèle est l'utilisation de critères quantitatifs seulement, comme la distance totale à parcourir, le coût total de la manutention et autres. Tous les modèles retrouvés dans la littérature utilisent des données déterministes et une mesure de distances de type non orienté. Le choix d'équipements de manutention ne fait pas partie des options disponibles. L'utilisation de la programmation mathématique permet la modélisation de plusieurs critères importants tels que : une forme régulière des départements, le positionnement des postes d'entrée/sortie, le calcul des distances réelles, ou une forme d'implantation incluant les couloirs. Par contre, ceci se fait au détriment de la simplicité d'utilisation d'un tel modèle par un utilisateur extérieur à l'environnement de recherche mathématique.

Le modèle de programmation linéaire de Montreuil et Ratliff (1988) a pour objectif le positionnement optimal des postes d'entrée/sortie de chaque département d'une implantation

existante. La distance utilisée est rectilinéaire. Aussi, une analyse de sensibilité est faite dans le but de connaître toutes les possibilités de positionnement qui ont peu d'influence sur la valeur de la fonction-objectif. Basé sur ce modèle, Montreuil et Venkatadri (1988) généralisent le problème d'implantation. En effet, cette nouvelle étude modélise simultanément la localisation relative optimale de toutes les cellules (ou départements) et le positionnement optimal des postes d'entrée/sortie. Le réseau de couloirs fait partie intégrante de ce modèle et les formes des départements peuvent être rectangulaires ou plus complexes.

D'autres auteurs, tels que Akinc (1985), Love et Dowling (1985), Malakooti et D'Souza (1987) et Heragu et Kusiak (1991) ont opté pour la modélisation à l'aide de la programmation linéaire pour le problème d'implantation. Le programme linéaire mixte en nombres entiers de Akinc (1985) inclut, à l'intérieur de la fonction-objectif, des coûts d'opération variables ainsi que des coûts de livraison. Love et Dowling (1985), pour leur part, modifient l'équation de la distance rectilinéaire puisqu'ils considèrent que la circulation se fait de façon indirecte, c'est-à-dire en utilisant le réseau de couloirs. Le modèle de Malakooti et D'Souza (1987) combine diverses techniques. En effet, un programme linéaire en nombres entiers permet la génération d'une première solution qui est améliorée à l'aide de CRAFT. Par la suite, une variation manuelle de certains poids des facteurs inclus dans la fonction-objectif permet une deuxième itération de programmation mathématique, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'une solution satisfaisante pour l'ingénieur industriel. Finalement, Heragu et Kusiak (1991) présentent un cas particulier du modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers proposé par Montreuil (1991), soit le problème d'implantation en épine dorsale. Deux cas sont étudiés, soit pour des départements de dimensions unitaires et soit pour des départements de superficie fixe avec forme rectangulaire ou carrée déterminée a priori. Les problèmes-types utilisés sont ceux de Nugent et al. (1968).

Un autre modèle de Montreuil et al. (1989) combine la programmation linéaire et la théorie des graphes. L'idée principale est de générer, à l'aide de la théorie des graphes, un schéma général de l'implantation. Les liens interdépartementaux sont traduits comme étant des segments de couloir. À partir de ce schéma, un modèle de programmation mathématique est utilisé dans le but de concevoir une implantation finale. Pour leur part, les modèles de

programmation linéaire mixte en nombres entiers de Montreuil (1991) et de Heragu et Kusiak (1991) utilisent une représentation continue du dimensionnement des départements.

Basée sur un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers, l'heuristique de Das (1993) permet le positionnement de postes d'entrée/sortie. Les superficies des départements sont variables mais de dimensions prédéterminées pour chaque département. Ce type de problème peut être associé à la localisation de machines en entreprises.

Aussi, Meller (1997) discute du problème multizone ("multi-bay"), similaire au problème multiétage. Son modèle de programmation linéaire mixte permet l'affectation de chaque département à une zone particulière. Par la suite, un algorithme de placement est utilisé pour la localisation des départements à l'intérieur de chaque zone. Une mesure de distance linéaire, centroïde à centroïde est utilisée. Différents problèmes tirés de la littérature (soit des problèmes multiétages modifiés) sont utilisés à titre de tests.

2.2.2 Modèles linéaires en nombres entiers résolus par la technique d'évaluation et de séparation progressive

La technique la plus utilisée pour résoudre un problème d'implantation décrit à l'aide d'un modèle de programmation linéaire en nombres entiers est la technique d'évaluation et de séparation progressive. Celle-ci est basée sur l'énumération implicite de toutes les solutions possibles dans le but de construire une implantation optimale pour le problème considéré. Les problèmes résolus sont déterministes et les données de type quantitatif. Les méthodes présentées dans la littérature sont associées à un environnement statique. La localisation des postes d'entrée/sortie n'est pas encore un critère propre à ce type de méthode.

La méthode de Gavett et Plyter (1965) se retrouve parmi les premières utilisant la technique d'évaluation et de séparation progressive dans le contexte d'implantation d'usine. La fonction-objectif utilisée ne comporte que des paramètres reliés à l'intensité de la circulation. Les départements sont de dimensions unitaires et les sites potentiels sont connus a priori. À l'aide des exemples proposés où le nombre de départements (n) est de 4, 5, 6, 7 et 8, les auteurs

concluent que cette méthode est facilement applicable à des problèmes ayant 8 départements ou moins.

La méthode de Bazaraa (1975) ne comporte pas d'attribution du positionnement des couloirs. Dans sa fonction-objectif, il inclut un terme associé aux coûts fixes de localisation d'une activité à un site particulier. Les superficies des départements sont inégales mais les périmètres sont constants pour un problème particulier. Aussi, les distances utilisées dans les calculs sont mesurées entre les centroïdes des départements. Les exemples présentés comptent respectivement 12 et 14 départements.

La méthode de Christofides et Benavent (1989) a permis de solutionner des problèmes comptant jusqu'à 25 départements. Cependant, aucun autre paramètre n'est additionné à cette méthode par rapport aux précédentes.

Pour sa part, Ketcham (1992) propose une méthode pour le cas particulier de localisation de machines. Il y inclut l'affectation de chaque activité à une machine particulière ainsi que le calcul du nombre optimal de machines de chaque type. Des variables associées aux temps de mise en course des machines en fonction des activités à effectuer sont ajoutées à la fonction-objectif. Des résultats sont obtenus pour divers problèmes, soit jusqu'à 20 types de machine et 70 opérations.

D'autres auteurs, comme Mans et al. (1995) et Hahn et al. (1998), ont élaboré des algorithmes utilisant la technique d'évaluation et de séparation progressive. Cependant, les caractéristiques des problèmes étudiés sont les mêmes que précédemment. Seules les performances de ces algorithmes, comme la vitesse d'exécution, la précision par rapport à la solution optimale ou le nombre de noeuds évalués, sont améliorées.

2.3 Méthodes heuristiques

Depuis les dernières années, il y a eu une importante évolution des méthodes permettant la génération d'implantations à l'aide d'heuristiques. De nouvelles avenues de recherche ont été

explorées et certaines d'entre elles sont très prometteuses quant à l'obtention de résultats nécessitant peu d'ajustements de la part de l'ingénieur industriel. Comme mentionnées précédemment, les catégories étudiées sont :

- 1) La méthode SLP de Muther;
- 2) Les heuristiques d'optimisation :
 - i) les algorithmes de recuit simulé ("Simulated Annealing");
 - ii) les algorithmes de la recherche tabou ("Tabu Search");
 - iii) les algorithmes génétiques;
- 3) L'intelligence artificielle :
 - i) les systèmes experts;
 - ii) la théorie des ensembles flous;
- 4) Les autres heuristiques.

Les données initiales nécessaires à la génération de solutions sont le tableau relationnel des circulations, des activités, ou la combinaison des deux, ou le processus de fabrication pour chaque produit avec la quantité correspondante à produire. Toutes ces méthodes sont divisées en deux étapes : la sélection des départements, et la localisation proprement dite des départements à l'intérieur de l'implantation. Chaque méthode utilise un algorithme qui lui est propre pour réaliser les étapes de façon simultanée ou consécutive. La qualité de la solution générée est fonction de l'algorithme utilisé pour chaque étape ainsi que des hypothèses de base inhérentes à chaque méthode.

2.3.1 Méthode SLP de Muther

Cette méthode de construction d'implantation par blocs est la plus connue et fait partie des outils les plus couramment utilisés pour l'analyse méthodique d'un système de production. Elle peut être basée à la fois sur des données quantitatives et qualitatives. Cette méthode très générale présente un ensemble de procédures comportant la quête des données, la combinaison et la simplification des données quantitatives et qualitatives, ainsi qu'une méthode visuelle de localisation des départements les uns par rapport aux autres. Ainsi, il est possible de générer une série de solutions parmi lesquelles la sélection de l'implantation peut être faite.

Le sens du flux entre deux activités n'est pas un critère utilisé dans l'analyse. Lorsque l'ingénieur industriel est expérimenté, il peut restreindre certaines localisations de départements. Aussi, il est possible de travailler sur plusieurs étages. La localisation des couloirs ainsi que des postes d'entrée/sortie sont faites après avoir établi l'implantation générale. Ces informations n'influencent donc pas la génération de la solution générale.

Cette méthode est de catégorie statique puisqu'elle ne permet pas une optimisation sur toute la durée de vie de l'implantation mais bien pour une période donnée seulement.

2.3.2 Heuristiques d'optimisation

Les algorithmes de recuit simulé, de recherche tabou et génétiques se retrouvent dans cette catégorie. Les données initiales sont les relations quantitatives associées aux paires d'activités. Les résultats obtenus ne sont pas optimaux et la méthode utilisée génère plusieurs implantations par itération. À chaque itération, une ou plusieurs implantations sont sélectionnées pour l'initialisation de l'itération suivante. Les implantations générées sont généralement de type par blocs, avec des départements de dimensions à périmètres fixes. Pour certains algorithmes, la notion de représentation continue est utilisée pour le dimensionnement des départements.

Algorithmes de recuit simulé

Cette méthode a pour but l'amélioration d'une implantation. Ce type d'heuristique se veut itératif. À chaque étape, la méthode génère une implantation et évalue la fonction-objectif correspondante. L'implantation est retenue ou mise de côté, selon certains critères prédéterminés. L'exécution se termine lorsqu'il n'y a plus de variation possible, au-delà d'un certain seuil, de la fonction-objectif. La méthode du recuit simulé permet la déviation d'une solution qui tendrait vers un optimum local. Tous les algorithmes proposés utilisent des distances rectilinéaires centre à centre ou réelles. Un avantage important relié à cette méthode est l'insensibilité de la solution finale par rapport à l'implantation initiale; ce qui n'est pas le cas d'autres types d'heuristique.

Le lien entre la méthode du recuit simulé utilisée en mécanique et les notions d'optimisation pour la localisation d'activités fut fait par Kirkpatrick et al. (1983). Quelques applications sont proposées telles que la minimisation du coût total de transport pour un problème de commis-voyageur, la minimisation des distances pour un problème de placement de composants électroniques et autres.

Wilhelm et Ward (1987) comparent les résultats générés à partir d'un algorithme de recuit simulé avec ceux générés par CRAFT et par la méthode de l'échantillonnage sélectif ("Biased sampling technique") de Nugent et al. (1968). Les problèmes-types utilisés sont de Nugent et al. (1968).

Jajodia et al. (1992) ont élaboré CLASS, une heuristique d'optimisation d'une implantation basée sur la méthode du recuit simulé. Le problème étudié inclut des départements de mêmes dimensions. Les données initiales des différents tests effectués sont aussi tirés de Nugent et al. (1968).

Kouvelis et Chiang (1992) associent la méthode de recuit simulé à un problème d'implantation linéaire pour un système d'atelier flexible.

Des contraintes de zonage, c'est-à-dire la localisation ou non de certains départements dans un même environnement immédiat, sont incluses dans l'heuristique de Kouvelis et al. (1992). Les tests sont tirés de Nugent et al. (1968), Hillier (1963) et Golany et Rosenblatt (1989), et ce pour des problèmes comptant de 5 à 30 départements.

L'heuristique LOGIC de Tam (1992), de type construction et amélioration, est associée à des problèmes avec des départements de superficies inégales mais fixes pour chaque département. Cette heuristique utilise la notion de représentation continue pour le dimensionnement des départements. L'option de la localisation d'un ou plusieurs départements à des sites particuliers est disponible.

Harhalakis et al. (1996) combinent la formation de cellules et la génération d'implantations intracellulaires et générale. Les dimensions des départements sont ajustées en fonction d'un pourcentage prédéfini, relatif aux couloirs de circulation. Leur heuristique permet de positionner a priori des départements et le calcul des distances est fonction de la localisation des postes d'entrée/sortie. Les tests utilisent différents problèmes comportant une variation de la demande ou de la structure de produits.

Meller et Bozer (1996-1997) présentent des heuristiques d'amélioration d'une implantation associées au problème multiétage. Le premier algorithme, SABLE, est une modification de l'heuristique MULTIPLE de Bozer et al. (1991). Il met en application le concept de courbe de remplissage des espaces ("space filling curve"). Aussi, il nécessite la localisation a priori du monte-charge utilisé pour les déplacements verticaux. Le second algorithme, une extension de SABLE, permet la localisation, a priori, de plusieurs monte-charges. L'étape de localisation des départements à l'intérieur d'un étage particulier est basé sur la minimisation des coûts globaux de déplacements, et non des coûts associés aux déplacements sur cet étage. Cette hypothèse devrait être favorisée dans le cas où le flux entre étages est important. La mesure de distances utilisée est rectilinéaire et entre centroïdes.

Basé sur les travaux de Bozer et al. (1991), Matsuzaki et al. (1999) présente un algorithme de recuit simulé pour la génération d'une implantation multiétage combiné à un algorithme génétique pour l'optimisation (nombre, localisation et affectation) des monte-charges. À l'intérieur de la fonction-objectif, les coûts d'installations (fonction du nombre de monte-charges) sont additionnés.

Algorithmes de recherche tabou

Comme la méthode de recuit simulé, la génération d'une solution finale avec la recherche tabou se fait sur une base itérative. Au cours du processus, la méthode permet le choix d'une solution de qualité moindre que la précédente, toujours dans le but de ne pas être affecté par un minimum local. La différence entre les deux types d'heuristique est que la recherche tabou restreint le choix des solutions intermédiaires. En effet, une table est créée lors du processus

itératif. Cette table est mise à jour à chaque itération. À l'intérieur de celle-ci, une liste de solutions intermédiaires s'y retrouve. Ainsi, le choix de la solution à l'itération i est fonction des itérations antérieures, c'est-à-dire que la sélection ne peut être la même que l'une des x itérations précédentes, x étant la longueur de la liste tabou. Cet algorithme de recherche de solutions a été présenté par Hansen (1986) et par Glover (1989). Différents auteurs ont relié cette méthode à la résolution de problèmes de localisation de centres de distribution, à l'association de commandes en fonction de machines dans un environnement de production par commande, et autres. Skorin-Kapov (1990) fait le lien entre le problème d'affectation quadratique et l'utilisation de la recherche tabou pour l'élaboration de solutions.

Chiang et Kouvelis (1996) présentent un algorithme pour la localisation de machines de mêmes dimensions. Contrairement aux heuristiques précédentes, la longueur de la liste tabou est variable et déterminée par des bornes supérieure et inférieure. Les problèmes-types classiques sont utilisés. Les données initiales sont toujours les mêmes : une matrice de distance et une matrice de flux intermachines.

Pour leur part, Chiang et Chiang (1998) considèrent un algorithme combinant la notion de recherche tabou pour l'étape de la génération d'implantations et le recuit simulé pour l'étape d'évaluation des solutions potentielles.

L'heuristique d'amélioration de Chittratanawat et Noble (1999) inclut des contraintes de positionnement des postes d'entrée/sortie et de sélection des équipements de manutention. Ces contraintes sont gérées de façon simultanée avec la localisation des activités. Une autre nouveauté est la combinaison de critères quantitatifs et qualitatifs dans l'évaluation de la fonction-objectif. Les formes des activités sont rectangulaires ou carrées et de périmètres fixes, et les coûts de manutention sont évalués proportionnels à la distance parcourue. Aussi, la mesure de distance est rectilinéaire et réelle, contrairement à une approximation de distance entre centroïdes utilisée par les autres méthodes.

Comme avec la méthode du recuit simulé, les problèmes étudiés sont classiques. Cette avenue de recherche étant très récente, le degré de complexité est faible et peu de contraintes sont prises en compte lors de la recherche de solutions.

Algorithmes génétiques

Proposée par Holland (1975), cette méthode se base sur les notions de génétique. Une chaîne de caractères est associée à une solution potentielle. À un ensemble de chaînes, soit une population, sont appliqués les principes de génétique : la reproduction, la sélection et la mutation. Une génération de solutions est donc créée. Le processus est itératif jusqu'à l'obtention d'une solution finale. Contrairement aux heuristiques précédentes, les algorithmes génétiques permettent l'exploration de plusieurs régions du domaine de solutions, et ce de façon parallèle.

Michalewicz (1992) présente le concept d'algorithmes évolutifs, c'est-à-dire, une heuristique basée sur les notions de génétique et permettant d'utiliser un codage autre que binaire, soit adapté au type de problème étudié.

Des auteurs tels que Tate et Smith (1994) et Suresh et al. (1995) présentent des algorithmes d'amélioration basés sur la distance interdépartementale. Les données initiales et les caractéristiques prises en compte sont les mêmes. Les variantes sont associées à l'élaboration de l'algorithme et à leur performance par rapport au temps d'exécution ou au coût global de l'implantation finale. Ils considèrent des départements de dimensions inégales et ils utilisent les problèmes classiques ou autres problèmes tirés de la littérature.

Delmaire et al. (1995a) associent l'implantation d'usine et la recherche de solutions avec la méthode d'algorithme génétique, et ce pour le problème d'affectation quadratique. Delmaire et al. (1995b) présentent une revue de littérature étendue sur le sujet.

Banerjee et al. (1997) introduisent la notion de représentation continue pour le dimensionnement des départements. Des bornes supérieures et inférieures doivent être définies

pour la mesure du périmètre, la longueur et la largeur des départements. Aussi, le positionnement des postes d'entrée/sortie est une autre variable considérée. Les problèmes classiques ainsi que d'autres problèmes plus récents sont étudiés.

Delmaire et al. (1997) présentent un algorithme pour des cas particuliers de l'implantation d'usine, soit l'épine dorsale et les formes en T et en O. Le squelette du réseau de couloirs est connu a priori. Leur algorithme comprend deux phases exécutées à chaque permutation : 1- un algorithme génétique ayant pour objectif le positionnement relatif des départements, 2- un modèle de programmation linéaire associé au dimensionnement des départements et à la localisation des postes d'entrée/sortie. Les problèmes générés pour évaluer leur algorithme comptent 12, 22 et 32 départements.

MULTI-HOPE est un algorithme proposé par Kocchar et Heragu (1998) permettant de résoudre des problèmes multiétages. Les départements peuvent être de différentes dimensions et aucune affectation d'un département sur plus d'un étage n'est permise. Une autre heuristique développée par Kocchar et Heragu (1999) et basée sur MULTI-HOPE considère un environnement dynamique de deux périodes. Aussi, ils utilisent le concept de courbes de remplissage des espaces pour l'établissement de l'implantation. Les problèmes de Meller et Bozer (1997) et d'autres auteurs sont utilisés pour évaluer les performances de leur heuristique. Les départements et les implantations générales sont de formes irrégulières.

Islie (1998) propose un algorithme multicritère permettant la localisation de départements de superficies inégales. Les critères évalués sont les distances parcourues, le ratio périmètre/superficie de chaque département et le différentiel entre les espaces requis et les espaces attribués. Il applique la notion de courbe de remplissage des espaces et la mesure de distance utilisée est rectilinéaire entre centroïdes. Les tests comptent 12 départements et moins.

Le modèle de Rao et al. (1999) est axé sur la génération et l'amélioration de cellules de production à l'aide d'un algorithme génétique combiné au logiciel AutoCAD pour l'aménagement physique en tenant compte de limitations physiques et des dimensions des équipements et du

bâtiment. Ils considèrent un environnement dynamique et utilisent des données provenant d'industries.

Hamamoto et al. (1999) utilisent aussi des données tirées d'un cas industriel. Ils considèrent un double objectif : la minimisation des temps de déplacements par voyage et la maximisation du débit de production ("throughput rate"). Pour l'atteinte de ces objectifs, ils proposent un algorithme génétique pour l'établissement de la séquence de placement des départements combiné à une heuristique pour leur positionnement et à un modèle de simulation pour l'évaluation de l'implantation générée. Les résultats comportent des formes irrégulières du bâtiment et des départements.

D'autres auteurs ont développé des algorithmes utilisant la notion de génétique. Cependant, les données initiales considérées et leurs caractéristiques sont les mêmes. La performance de l'algorithme, que ce soit en fonction de la valeur de la fonction-objectif ou du temps d'exécution, est le principal critère pour l'élaboration des diverses méthodes.

En résumé, les problèmes d'implantation étudiés ont des départements de forme rectangulaire et de dimensions variables. Le positionnement des couloirs est établi a priori, comme pour l'heuristique de Delmaire et al. (1997), ou n'est tout simplement pas considéré. La mesure des distances est rectilinéaire entre centroïdes. Les problèmes classiques sont parfois utilisés et certains auteurs tentent de comparer leurs résultats avec ceux présentés dans la littérature. Cependant, la plupart des auteurs génèrent leur propre ensemble de problèmes d'implantation d'usine.

2.3.3 Intelligence artificielle

Cette catégorie inclut les méthodes utilisant un système expert ou les notions de la théorie des ensembles flous. Ces méthodes permettent une plus grande flexibilité par rapport aux données initiales considérées, comme la restriction de localisation ou l'orientation particulière d'une activité. Les problèmes utilisés pour l'évaluation d'une méthode sont généralement générés par les auteurs.

Systèmes experts

Un système expert est basé sur l'établissement de règles de décision permettant la construction d'une implantation. Ces règles, quantitatives et qualitatives, sont établies par des personnes d'expérience connaissant tous les paramètres du problème étudié et surtout ceux reliés aux règles de décision de l'entreprise. Ainsi, les méthodes élaborées par les différents auteurs tiennent compte de plusieurs critères d'analyse. L'équation de la fonction-objectif peut donc être qualifiée de complexe.

Kumara et al. (1988) ont élaboré IFLAPS, une méthode d'implantation de type système expert. Les principales hypothèses inhérentes à leur méthode sont : le dimensionnement unitaire des départements et la localisation, a priori, des sites potentiels. Les auteurs soulèvent le problème où les départements sont de dimensions variables. La méthodologie de résolution suggérée est très simple : il suffit de calculer le dénominateur commun de la superficie de tous les départements et de diviser chacun de ceux-ci en blocs de dimensions équivalentes. Les blocs définissant un même département doivent avoir une relation entre eux très importante. Ainsi, ces blocs seront positionnés dans un environnement immédiat. Il est aussi possible de restreindre la forme des départements ainsi créés. Les problèmes résolus sont pour 7 et 9 départements.

Malakooti et Tsurushima (1989) ajoutent un facteur de priorité aux règles de décision utilisées. Différentes implantations peuvent être générées en modifiant la valeur de certaines priorités. Aussi, il y a un début d'interaction, de la part de l'ingénieur industriel, au cours du processus d'analyse et de sélection de l'implantation finale. Leur méthode permet des départements de dimensions variables. Par contre, la gestion de cette possibilité est la même que celle proposée par Kumara et al. (1988), soit la division de tous les départements en unités de mêmes dimensions. Des tests sont effectués pour $n = 6, 10$ et 13 .

Abdou et Dutta (1990) proposent un système expert où le réseau de couloirs de circulation de l'implantation générale est prédéterminé. En effet, ils se basent sur le fait que pour tout type d'implantation, il existe un réseau de couloirs idéal. La sélection des équipements de

manutention est effectuée à l'intérieur d'une première étape d'analyse. L'exemple présenté inclut 8 départements de dimensions variables.

Un modèle très connu est celui d'Heragu et Kusiak (1990). Ce système expert est présenté dans un contexte d'implantation de machines. Ainsi, les machines sont de différentes dimensions et peuvent nécessiter une orientation particulière lors de leur positionnement. Leur algorithme inclut des caractéristiques des couloirs puisqu'il est nécessaire de spécifier le type d'équipement de manutention utilisé pour déterminer entre autre la largeur d'allées et l'espace nécessaire entre les machines. Aussi, il est possible de restreindre la localisation de machines à des sites particuliers. Un exemple de 8 machines est présenté. Les auteurs spécifient que pour des problèmes où le nombre de département est inférieur ou égal à 8, la technique d'évaluation et de séparation progressive peut être employée.

La particularité de AILAY, un modèle de Shih et al. (1992) est l'ajout d'une procédure d'amélioration à l'intérieur même de la procédure de construction. Des tests sont effectués et comparés aux résultats de CRAFT pour $n = 9$ à 20.

Sarin et al. (1992) présentent un algorithme avec fonction-objectif multicritère incluant les relations quantitatives et qualitatives. Les départements sont de périmètres prédéterminés et de superficie non unitaires et la distance utilisée est rectilinéaire entre les centroïdes des départements. L'implantation générée est de forme irrégulière. Un problème résolu comptant 13 départements est présenté.

D'autres auteurs, tels que Sirinaovakul et Thajchayapong (1994), proposent des algorithmes pour la résolution du problème d'implantation d'usine à l'aide de systèmes experts. Cependant, la complexité quant aux données initiales et aux caractéristiques reste la même que les algorithmes présentés.

Théorie des ensembles flous

Cette méthode est actuellement utilisée pour la construction d'implantation. Les données qualitatives utilisées (incluant l'évaluation des distances) peuvent être qualifiées de stochastiques, dans un environnement statique. Le principal avantage de cette méthode est associée à l'évaluation des différents paramètres. Seul l'intervalle de valeurs est à déterminer. Les conséquences du manque de données et de la variabilité temporelles de celles-ci sont donc minimisées. Ainsi, chaque paramètre, qu'il soit quantitatif ou qualitatif, est défini à l'aide d'une échelle de valeurs comme : très important, moyen et faible. Pour chaque combinaison d'activités, les paramètres sont évalués. Par la suite, des règles de décision sont appliquées, selon les algorithmes proposés par les auteurs, et la valeur finale de chacune des combinaisons d'activités est établie. La plupart des auteurs définissent cette valeur en terme de distance ou de cote (comme les cotes de Muther (1973)). Finalement, une heuristique de sélection et de placement est utilisée pour l'élaboration d'une implantation.

La théorie des ensemble flous est souvent utilisée en collaboration avec la théorie des probabilités. Ces deux notions se complètent bien pour la résolution de problèmes où l'incertitude des données initiales apparaît sous diverses formes. Les problèmes d'implantation étudiés sont d'un seul étage et l'orientation des activités n'est pas incluse dans l'analyse. La forme des départements est prédéfinie et pas nécessairement rectangulaire.

La théorie des ensembles flous est une orientation de recherche assez récente pour ce qui est de l'application au domaine de l'implantation d'usine. En effet, les premiers travaux furent réalisés au milieu des années 1980. Les recherches de Grobelny (1987) comportent une possibilité du respect des couloirs existants puisque la localisation des sites potentiels est connue a priori. Aussi, les dimensions de ceux-ci sont unitaires et les distances intersites sont définies qualitativement. Aucun test n'est effectué; seul un exemple où $n = 4$ est présenté. Une autre méthode de Grobelny (1988) inclut des restrictions reliées au dimensionnement fixe et à l'orientation particulière des activités. De plus, cette méthode établit une liaison directe entre les systèmes experts et la théorie des ensembles flous. L'exemple présenté est l'affichage d'instruments de mesure sur un tableau de bord d'une automobile.

Contrairement à la méthode de Grobelny (1988), celle de Raoot et Rakshit (1991) restreint les dimensions extérieures du bâtiment. Par contre, comme Grobelny (1987-1988), les auteurs font référence à un problème d'implantation par blocs. Un exemple est donné où $n = 8$ et où les superficies des départements sont constantes et les périmètres variables pour un problème donné. Une seconde méthode de Raoot et Rakshit (1993) possède les mêmes caractéristiques que la précédente. Aussi, elle permet la génération de plusieurs solutions. Par la suite, ces solutions sont triées en fonction de la valeur de la fonction-objectif. Ainsi, l'ingénieur industriel a la possibilité de sélectionner l'implantation finale à l'intérieur de cet ensemble de solutions. Un exemple comptant 8 départements est présenté. Les travaux de Raoot et Rakshit (1991-1993) utilisent une fonction-objectif basée sur la distance interactivités.

Les travaux de Badiru et Arif (1996) comptent trois étapes pour la génération d'une implantation. La première étape utilise l'algorithme FLEXPERT, associé à la théorie des ensembles flous, pour le calcul des cotes des départements. Les cotes sont associées aux relations interdépartementales de chacun. La seconde étape a pour objectif la génération de plusieurs implantations à l'aide d'une heuristique tirée de la littérature. La troisième étape permet l'évaluation des implantations et la sélection finale. Contrairement aux autres heuristiques de cette catégorie, FLEXPERT considère des relations quantitatives et qualitatives.

Les travaux de Dweiri et Meier (1996) sont de caractéristiques similaires à celles des travaux de Badiru et Arif (1996). Le logiciel utilisé pour la génération d'implantations est une version modifiée de CORELAP.

Une nouvelle orientation de recherche définie dans la littérature est la présentation du problème d'implantation sous forme de réseau de neurones. Les données initiales de l'heuristique de Tsuchiya et al. (1996) sont classiques, c'est-à-dire des paramètres de distance et de coûts. Les départements sont de dimensions unitaires et l'implantation de type par blocs. Les problèmes étudiés sont tirés de Nugent et al. (1968) et de Skorin-Kapov (1990).

2.3.4 Autres heuristiques

Cette catégorie est associée aux logiciels utilisant des heuristiques de sélection et de localisation des départements propres à chaque auteur. La majorité des logiciels est élaborée pour des implantations par blocs. Les distances utilisées sont rectilinéaires entre centroïdes. Les problèmes étudiés à l'aide de ce type de méthode utilisent des données initiales déterministes et l'analyse ne peut être faite que pour une période particulière à la fois.

Les algorithmes informatisés les plus connus sont CRAFT, CORELAP, ALDEP, PLANET et COFAD. CRAFT et COFAD sont des méthodes d'amélioration d'une implantation. COFAD ajoute la sélection de l'équipement de manutention basée sur une liste préétablie d'équipements. CRAFT permet l'analyse de problèmes comportant des départements de différentes dimensions mais sans variation extrême des superficies et ayant des données quantitatives seulement. Des données qualitatives sont utilisées avec CORELAP et ALDEP. Une révision, de la part de l'ingénieur industriel, est nécessaire quant au réalisme de la solution finale générée par toutes ces méthodes.

Rosenblatt (1979) propose une heuristique avec une fonction-objectif multicritère pondérée. Les données sont qualitatives et quantitatives, les départements de dimensions unitaires, et la mesure des distances rectilinéaire. L'algorithme présenté tient compte des poids prédéfinis des divers facteurs seulement lors de l'évaluation finale des implantations incluses dans l'ensemble de solutions réalisables. Cette méthodologie peut donc éliminer des implantations qui, pour certains poids de facteurs quantitatifs et qualitatifs, sont optimales. L'heuristique de Malakooti (1989) est une autre variante utilisant les mêmes données initiales. Les dimensions des départements sont, encore ici, unitaires.

Les premiers auteurs à intégrer les notions de modélisation d'implantation et de structure informatique interactive sont O'Brien et Abdel Barr (1980). Ils ont développé une heuristique combinant la conception et l'amélioration d'une implantation avec une approche interactive. MICROLAY, de Wäscher et Chamoni (1987), offre le choix de la conception, à l'aide d'un algorithme, d'une implantation initiale ou de l'utilisation d'une implantation définie par

l'ingénieur industriel. Par la suite, chaque étape d'amélioration (utilisant la méthode de CRAFT) doit être validée par l'ingénieur industriel. MOCRAFT de Svestka (1990) est une variante de CRAFT comportant une fonction-objectif multicritère. Encore ici, il est possible d'influencer la génération d'implantations intermédiaires et finale.

SPACECRAFT de Johnson (1982), une heuristique basée sur CRAFT, permet l'amélioration d'implantation multiétage. Elle tient compte du fait qu'un déplacement horizontal n'a pas la même vitesse de croisière qu'un déplacement vertical. Cependant, la méthode permet la localisation d'un département sur plusieurs étages et les formes des départements peuvent être irrégulières. La méthode de construction de Kaku et al. (1988) reprend la notion d'implantation multiétage; les problèmes étudiés ont des départements de dimensions équivalentes. Leur heuristique a pour objectif le rassemblement de départements en différentes cellules. La fonction-objectif vise à minimiser les interactions intercellulaires et à maximiser celles intracellulaires. Par la suite, chacune de ces cellules est associée à un étage particulier et une implantation générale de chaque étage peut être élaborée. MULTIPLE de Bozer et al. (1991), une heuristique d'amélioration, gère aussi des aménagements multiétages. Les dimensions des diverses activités sont délimitées par des bornes supérieures et inférieures. Les échanges entre étages sont permis si l'espace est suffisant pour accueillir le nouveau département sur chaque étage concerné. Le concept de courbes de remplissage des espaces est utilisé avec des contraintes associées à la largeur des départements. Cette méthode permet le positionnement a priori de départements.

La méthode avec fonction-objectif multicritère de Fortenberry et Cox (1985) tente d'améliorer une implantation par blocs. Le problème étudié est de nature statique et les départements associés doivent être de dimensions unitaires.

SHAPE de Hassan et al. (1986) est une méthode de construction d'une implantation où les périmètres des départements sont variables. L'implantation finale peut comporter des formes irrégulières de départements. Jacobs (1987) présente aussi une méthode de construction d'implantation. Sa méthode a pour but d'optimiser une forme d'implantation existante à l'aide

d'une fonction multicritère, tout en respectant des contraintes telles que l'emplacement des murs et des postes d'entrée/sortie.

L'algorithme de Drezner (1987), DISCON, élimine l'hypothèse associée à des départements de formes rectangulaires pour l'élaboration de la solution initiale. Les départements sont représentés par des cercles ayant des superficies adéquates. Par la suite, l'ajout de bornes rectangulaires pour chaque département permet de générer diverses solutions finales. Les critères de la fonction-objectif sont qualitatifs seulement. Une version plus récente proposée par Safizadeh et McKenna (1996) utilise les mêmes données initiales.

La comparaison d'heuristiques d'implantation, faite par Kusiak et Heragu (1987), est basée sur les problèmes-types de Nugent et al. (1968). Les résultats permettent d'établir que les meilleurs algorithmes dans les cas suivants sont :

- 1) Pour des départements de dimensions variables :
 - i) construction = FLAT d'Heragu et Kusiak (1986)
 - ii) amélioration = CRAFT de Buffa et al. (1964)
- 2) Pour des départements de dimensions équivalentes :
 - i) construction = Linear Placement Algorithm de Neghabat (1974)
 - ii) amélioration = FRAT de Khalil (1973)

FLAT utilise des données déterministes. La sélection des départements est basée sur le calcul d'un flux ajusté pour tout triplet de départements. Ce poids est la sommation du flux multiplié par la distance minimale à parcourir par paire de départements, et ce pour les trois combinaisons associées à un triplet particulier. Une première sélection du triplet de valeur maximale est faite. De cette sélection, les trois départements sont triés, sélectionnés et positionnés sur l'implantation. Un biais est observé pour des implantations ayant un département de grande superficie. Le calcul du poids de ce département par rapport aux autres départements est amplifié vu la grande distance à parcourir du centre du département à son périmètre.

Dans le cas de l'heuristique de Neghabat (1974), la sélection de départements à positionner est uniquement fonction du flux par paire de départements. La localisation est basée

sur la minimisation du coût de l'implantation intermédiaire générée. Cette heuristique permet le respect de contraintes de dimensionnement de l'implantation finale.

La méthode FRAT comporte trois procédures : la détermination des coûts totaux pour tout département, la permutation calculée, et la permutation aléatoire de deux départements. La seconde procédure est itérative et est basée sur la comparaison des coûts totaux par rapport à une valeur minimale prédéterminée. Une itération consiste à évaluer le coût de la permutation de toutes les paires de départements. Le nombre de calculs à effectuer pour une itération est donc en relation directe avec le nombre de départements à gérer, n . À la dernière étape, toute diminution du coût total implique un échange de départements. Encore ici, le nombre de calculs à effectuer est très élevé.

Rosenblatt et Lee (1987) tentent de modéliser le problème d'implantation par blocs avec une demande variable. À chaque valeur de la demande est associée une probabilité. Leur principal objectif est l'évaluation de la stabilité ("robustness", un critère de flexibilité) de l'implantation générée à l'aide de leur méthode. Rosenblatt et Kropp (1992) continuent la recherche dans cette orientation. Les données initiales incluent les différents scénarios possibles quant à la quantité à produire pour chacun des produits. Yaman et al. (1993) présentent un algorithme associé à la variation par produit de la quantité à fabriquer. Les départements sont de mêmes dimensions et la localisation des départements se fait en utilisant une courbe de remplissage des espaces de type spiralé.

Golany et Rosenblatt (1989) ont élaboré une heuristique de construction et d'amélioration d'implantation. La méthode utilisée est basée sur la technique d'évaluation et de séparation progressive. Les départements sont de dimensions unitaires et les tests proviennent tous de problèmes tirés de la littérature.

Houshyar et McGinnis (1990) élaborent une heuristique de construction associée au concept de réseau (un ensemble de noeuds et d'arêtes, respectivement les activités et les relations entre chaque paire d'activités). À chaque itération pour le positionnement d'une activité à un site prédéfini, un arbre de coupe minimale est établi. L'activité positionnée à une itération est

éliminée du graphe pour les itérations suivantes. Une implantation à épine dorsale est modélisée avec deux cas possibles : des sites potentiels seulement d'un côté de l'allée et des deux côtés de l'allée.

Les travaux de Langevin et al. (1991-1994) sont aussi applicables à une implantation de type épine dorsale. Leur heuristique utilise une liste ordonnée des paires de départements en fonction des fréquences de déplacements. Les départements d'un binôme sont positionnés en chaîne qui minimise la distance totale sur une épine dorsale. La deuxième étape de leur heuristique, un modèle de programmation linéaire, permet d'éliminer la contrainte reliée aux dimensions équivalentes avec périmètres fixes des départements utilisée par Houshyar et McGinnis (1990). Finalement, une étape d'amélioration de l'implantation générée est proposée.

Rosenblatt (1979) propose un modèle de programmation linéaire pour la résolution du problème d'affectation quadratique (PAQ). La fonction-objectif inclut une pondération prédéfinie des relations quantitatives et des relations qualitatives. Une heuristique est proposée pour l'amélioration d'une implantation basée sur la fonction-objectif développée. Fortenberry et Cox (1985) utilisent aussi une fonction-objectif combinant les relations quantitatives (la distance et le flux) et les relations qualitatives. Un algorithme d'amélioration d'implantation est proposé. Urban (1987) et Houshyar (1991) reprennent les méthodes à fonction-objectif multicritère de Rosenblatt (1979) et de Fortenberry et Cox (1985) pour en modifier l'équation de la fonction-objectif. Une autre caractéristique de l'algorithme de Houshyar (1991) est l'ajout dans la fonction-objectif d'une variable de pondération pour les facteurs qualitatifs et les facteurs quantitatifs. Ainsi, la résolution du problème d'implantation inclut la recherche de la combinaison optimale du poids des facteurs quantitatifs et qualitatifs.

L'heuristique proposée par Harmonosky et Tothéro (1992), toujours avec fonction-objectif multicritère, inclut une étape de construction et une autre d'amélioration. La méthode a pour résultat une implantation de formes régulières. Les exemples proposés ont respectivement 6, 8, 12 et 36 départements.

L'heuristique de Herrmann et al. (1995) utilise des notions de la théorie des graphes et de programmation linéaire. La fonction-objectif comporte des coûts fixes et des coûts variables. Les coûts fixes sont associés à la construction d'un segment d'allée, à l'espace utilisé et au contrôle. Les coûts variables représentent la manutention. Ils considèrent que ces coûts sont en opposition puisque, par exemple, l'augmentation du nombre de segments d'allée implique généralement une plus grande flexibilité de manutention et des itinéraires plus directs.

Les travaux de Venkatadri et al. (1997) sont associés à un nouveau type d'implantation, soit l'implantation fractale reliée à une production à façon ("job shop"). Ils établissent une heuristique permettant la construction et l'amélioration d'une implantation, combinée à la détermination l'affectation des produits aux différents équipements de production. Les cellules générées sont de formes rectangulaires et de dimensions équivalentes. Les machines sont représentées par une unité de surface. Les données nécessaires à l'exécution de leur algorithme comprennent la demande, la séquence des opérations et les temps de fabrication par produit, ainsi que le nombre d'heures disponibles par machine.

Montreuil et al. (1999) décrivent les différentes étapes pour la génération d'une implantation de type fractal :

- 1- planification de la capacité nécessaire
- 2- création des cellules
- 3- affectation des opérations aux machines
- 4- aménagements global et cellulaires

La première étape considère les temps et la séquence des opérations, la disponibilité des équipements de production et la duplication des équipements. La duplication est fonction de la demande, de la capacité et de la minimisation des coûts d'investissements et d'opérations. La deuxième étape élimine la contrainte d'affectation exclusive d'un équipement à une cellule. La troisième étape élimine la contrainte reliée à l'affectation d'un produit à une cellule particulière. La quatrième étape inclut à l'amélioration des aménagements. Ils utilisent des algorithmes retrouvés dans la littérature pour la résolution des différentes étapes. Ils complètent les données

des problèmes de Venkatadri et al. (1997) et de Co et Araar (1988) pour l'évaluation de leur méthode.

Askin et al. (1999) décrivent de façon comparative les deux plus récents types d'implantation (holographique ou holonique, et fractal). Aussi, un modèle de simulation est utilisé pour évaluer les performances de chacun pour différents cas générés. Les critères utilisés sont le nombre de machines nécessaires, les dimensions du bâtiment, le taux d'utilisation des équipements, les temps de manutention et autres.

Chen et Sha (1999) présentent une revue de littérature axée sur le problème d'implantation avec multiobjectif. Ils proposent un nouvel algorithme d'amélioration permettant la normalisation, dans la fonction-objectif, des critères quantitatifs et qualitatifs. La mesure de distance est rectilinéaire et les départements de dimensions unitaires. Les données des travaux de Nugent et al. (1968), de Harmonosky et Toth (1992) et d'autres auteurs ainsi que des données générées aléatoirement sont utilisées pour l'évaluation de leur heuristique.

2.4 Théorie des graphes

Ce type de méthode donne un point de référence pour la construction d'implantation ayant des relations interdépartementales non négatives. En effet, la solution générée présente des liens entre les divers départements pouvant facilement s'apparenter aux couloirs existants à l'intérieur d'une implantation. Donc, la circulation se fait seulement sur ces liens et les distances sont, règle générale, rectilinéaires et calculées de centre à centre des départements. Trois étapes définissent les méthodes présentées dans la littérature et associées à la théorie des graphes :

- 1) Établissement du graphe d'adjacence ("adjacency graph"),
celui-ci étant un graphe planaire,
- 2) Construction du graphe dual,
- 3) Conversion du graphe dual en implantation par blocs.

Étant donné l'application de cette théorie à des graphes de type planaire, la valeur de la borne supérieure de la fonction-objectif est équivalente à la somme des $3n - 6$ relations inter-

départementales les plus importantes où n représente le nombre de départements. Aussi, la maximisation des relations ne tient compte que des liens où les départements sont adjacents. La troisième étape est sans contredit la plus difficile à établir, de là l'imposant nombre d'articles concernant ce sujet. Plusieurs implantations viables peuvent être générées (habituellement, de façon manuelle) à partir d'un même graphe.

L'algorithme TESSA de Boswell (1992) a pour objectif d'élaborer un graphe d'adjacence, soit la première étape associée à la génération d'une implantation à l'aide de la théorie des graphes. La particularité de son algorithme est le fait qu'il n'est plus nécessaire de tester à chaque itération la planéité du graphe généré. L'algorithme de Goldschmidt et al. (1996) fait aussi référence à la première étape. Les données initiales sont les mêmes, seul l'algorithme de calcul est amélioré.

Toujours associé à la première étape, Pesch et al. (1999) incluent les relations qualitatives (incluant les incompatibilités, c'est-à-dire les relations négatives) dans leur algorithme de construction et d'amélioration. Les tests effectués sont générés aléatoirement pour de 10 à 40 départements.

La méthode de Foulds (1983) est associée à un problème d'implantation où les superficies sont équivalentes et les dimensions prédéfinies. L'algorithme de Montreuil et al. (1987), "b-couplage", comporte aussi ces caractéristiques. De plus, celui-ci, de type interactif, permet l'imposition de contraintes de localisation de départements. Une particularité de l'algorithme de Montreuil et Ratliff (1989) est la distinction entre les départements et les postes d'entrée/sortie de chaque département lors du calcul des distances interdépartementales.

Une autre approche au problème d'implantation est celle de Picard et Ratliff (1978). Ils modélisent un problème de localisation de n nouvelles activités à l'intérieur d'une implantation où il existe déjà m activités en utilisant la notion d'arbre de coupe minimale.

Après la comparaison d'une heuristique basée sur la théorie des graphes avec un algorithme glouton, Foulds et al. (1985a-1985b) concluent que la durée d'exécution d'un

algorithme glouton est plus longue, en moyenne. Cependant, la qualité des résultats obtenus avec ce type d'algorithme est, règle générale, équivalente ou supérieure à celle des résultats d'un algorithme associé à la théorie des graphes.

Giffin et Foulds (1987) incluent, à l'intérieur de la fonction-objectif, les relations entre les départements non adjacents. Les différents tests effectués sont de l'ordre de $n = 10$ à 40.

Hassan et Hogg (1989-1991) ajoutent une procédure de localisation (troisième étape) à leur méthode d'optimisation utilisant la théorie des graphes. Les superficies des départements sont prédéfinies et les dimensions peuvent être variables. L'exemple présenté contient 5 départements. Ils conviennent que la théorie des graphes comporte plusieurs limites et que l'implantation par blocs résultante ne démontre pas, pour le moment, d'avantage particulier. Ils concluent donc que les méthodes conventionnelles de construction d'implantation sont toujours d'actualité.

QLAARP, élaboré par Banerjee et al. (1992), est un algorithme interactif de construction et d'amélioration d'implantation. QLAARP permet d'évaluer diverses solutions associées à certaines modifications du squelette de l'implantation ("design skeleton"), par exemple la rotation, l'augmentation et la diminution d'un segment de couloir.

Hassan (1992) présente diverses observations quant à la conversion d'un graphe en une implantation par blocs. En effet, Hassan et Hogg (1991) considèrent que cette conversion nécessite plusieurs essais manuels, et l'ingénieur industriel se doit d'être habile lors de la conception d'une implantation basée sur les résultats obtenus à l'aide d'une méthode utilisant les notions de la théorie des graphes.

L'algorithme de Goetschalckx (1992) permet la génération et l'amélioration d'une implantation par blocs. Celui-ci peut gérer des départements de périmètres variables. L'addition de certaines contraintes minimise la création de départements de formes irrégulières.

Les travaux de Watson et Giffin (1997) et d'Irvine et Rinsma-Merchert (1997) sont aussi associés à la conversion d'un graphe dual en une implantation par blocs. Ces algorithmes peuvent considérer des départements de différentes dimensions. Cependant, les formes des départements inclus dans l'implantation finale sont irrégulières. De plus, l'algorithme de Irvine et Rinsma-Merchert (1997) permet une interaction de la part de l'utilisateur lors de la génération de l'implantation.

Feng et al. (1999) proposent une fonction-objectif pouvant être associée à un environnement de production de type travail à façon ("job-shop") puisqu'ils tentent de minimiser la distance entre le centre de l'implantation et le centroïdes de toutes les activités. L'exemple présenté comporte quatre activités de formes rectangulaires.

2.5 Simulation et théorie des files d'attente

Ce type de modèle est axé sur des objectifs de production tels que la maximisation du taux de production de l'usine, la minimisation du temps total de production, la minimisation du nombre de pièces incluses dans une file d'attente, et ainsi de suite. Ainsi, le positionnement des équipements de production (ou des départements) n'est plus nécessairement fonction de la distance à parcourir ou des coûts de manutention. L'utilisation de ce type de modèle nécessite, a priori, la connaissance du choix des équipements de manutention. Aussi, toutes les données initiales doivent être quantitatives.

Le modèle de Co et al. (1989) est basé sur l'heuristique CRAFT. Il génère une implantation par blocs. Les départements peuvent être de différentes tailles. Aussi, aucune restriction n'est imposée quant aux dimensions extérieures du bâtiment. Lors de l'étape d'amélioration de l'implantation, il est permis de modifier les formes des départements. Un exemple comptant 10 machines est présenté.

Butler et al. (1992) utilisent la simulation pour l'étape d'évaluation de l'implantation. Celle-ci est établie à l'aide d'un modèle de programmation mathématique en nombres entiers. Leur modèle peut être appliqué à un problème multiétage.

De façon générale, les logiciels de simulation offerts sur le marché ont pour but d'évaluer divers scénarios de production, ou différentes implantations comme le modèle d'Askin et al. (1999). Ainsi, les différents paramètres constituant un problème particulier sont modifiés manuellement par l'utilisateur. L'implantation finale sélectionnée est l'une des solutions générées avec l'utilisation de différents paramètres initiaux. Cette implantation est généralement reliée au positionnement relatif des équipements de production.

2.6 Analyse comparative

L'analyse des modèles et des techniques présentés dans la littérature en fonction des paramètres étudiés étant terminée, il est maintenant possible de condenser toutes les informations recueillies à l'intérieur d'un tableau. Il est évident que, pour une catégorie particulière, il est fort possible que divers modèles ou méthodes soient associés à différents paramètres de caractérisation. L'objectif de cette récapitulation est donc de dégager les tendances générales qui se rapportent à chaque catégorie et d'évaluer le degré de complexité des problèmes d'implantation d'usine étudiés. Le tableau 2.3 présente le résultat de l'association des paramètres avec les modèles et les techniques énumérés précédemment.

Les tendances générales d'utilisation des éléments inclus au tableau 2.3 doivent être soulignées. En effet, la majorité des recherches concerne des problèmes avec données initiales déterministes. Les données de type stochastique sont, lorsque utilisées, gérées avec l'approche probabiliste. Une proportion significative des modèles et des méthodes d'implantation fait usage de critères qualitatifs, toujours combinés à des critères quantitatifs, pour la conception, l'amélioration ou l'évaluation de l'implantation générée. Aussi, l'orientation des relations interdépartementales n'influence jamais la génération de l'implantation finale; ce qui n'est pas nécessairement réaliste. Par exemple, lorsque le système de manutention comporte des transporteurs ou des chariots automatiques, le sens de la circulation dans les allées est important.

Pour toutes les catégories de modèles et de méthodes étudiées, le degré de complexité du paramètre de dimensionnement des départements croît en fonction du temps. Initialement, les dimensions sont de type unitaire. Lorsque la gestion, de la part des algorithmes élaborés, de ce

type de donnée est satisfaisante, les dimensions non unitaires avec périmètres fixes sont prises en compte. Finalement, les problèmes associés à une représentation continue, c'est-à-dire des dimensions non unitaires des départements avec périmètres variables, sont traités. Cette caractéristique permet une plus grande flexibilité quant au dimensionnement et au positionnement des départements. La majorité des modèles et des techniques considérant cette caractéristique inclut des contraintes associées à des formes rectangulaires des départements ainsi qu'au respect d'un ratio prédéterminé de la longueur sur la largeur des départements.

La restriction de localisation de certains départements est présente dans près de 65 pour cent des classes de modèles et de méthodes. Il est probable que la trivialité d'application de cette contrainte à tout modèle ou méthode présenté dans la littérature implique une omission volontaire de la part de certains auteurs pour ne pas alourdir inutilement leur algorithme. Cependant, une contrainte de localisation reliée à certains départements seulement peut avoir une influence marquée sur la solution finale générée. Le positionnement des quais de chargement/déchargement, de la réception ou de bureaux sur les pourtours du bâtiment sont des exemples très courants d'exigences retrouvées en entreprises. La restriction peut aussi être de sens opposé, soit l'interdiction de localisation d'un département à l'intérieur d'une zone particulière. Par exemple, une activité nécessitant un équipement de caractéristique non standard (le poids, la hauteur, ou autre) peut être limitée quant aux possibilités de localisation. Il serait donc intéressant d'analyser les effets de ce type de contrainte et d'inclure ce degré de flexibilité à l'intérieur de tout modèle ou technique d'implantation d'usine.

L'orientation particulière d'une activité est une caractéristique très répandue pour la modélisation de problèmes de localisation de postes de travail, mais très peu pour le problème d'implantation d'usine. Pour un poste de travail de forme rectangulaire, cet obstacle peut être contourné en limitant les dimensions de l'activité selon un axe particulier. Les bornes supérieure et inférieure de la longueur d'arête d'un poste longeant le réseau de couloirs permettent ainsi une orientation adéquate lors de la localisation de ce poste de travail.

De plus en plus de modèles et de méthodes tiennent compte des problèmes multiétage. Tel que défini par Kocchar et Heragu (1998), 2 approches sont utilisées :

- 1) l'algorithme en une seule étape ("single-stage algorithm"),
- 2) l'algorithme en deux étapes ("two-stages algorithm").

La première approche permet la génération d'une solution réalisable et, par la suite, celle-ci est améliorée l'aide d'une heuristique d'échange de départements. La seconde approche compte deux étapes, soit la distribution des départements sur les différents étages et soit la génération d'une solution réalisable. Ces deux étapes peuvent être faite consécutivement et de façon itérative jusqu'à la solution finale, ou la première étape est répétée jusqu'à la solution finale, et ce avant l'exécution de la seconde étape. Cette dernière approche semble être la plus fréquemment employée dans la littérature. De plus, bon nombre d'auteurs affirmant résoudre des problèmes multiétages considèrent de façon implicite un classement des départements en groupes ("clusters"), ceux-ci étant sensiblement mêmes dimensions totales et étant associés à chaque étage du bâtiment. Par la suite, les divers modèles et méthodes de génération d'implantations proposés peuvent être appliqués pour chacun des groupes ainsi formés. L'interrelation entre les divers étages peut être extrapolée en ajoutant, à tous les paliers et localisée aux mêmes coordonnées si nécessaire, une activité factice, telle qu'un escalier, permettant de faire état de ces liens intergroupes.

Moins de la moitié des classes de modèles et de méthodes étudiés inclut un algorithme d'amélioration d'implantation. Une situation de construction d'un nouvel édifice, d'un déménagement, ou d'un agrandissement majeur permet d'utiliser une méthode de construction. Pourtant, il existe beaucoup de cas où l'entreprise possède déjà une implantation qui ne requiert qu'un réaménagement dans le but d'en optimiser le rendement. Dans le contexte actuel de l'économie, les entreprises ont tendance à envisager un réaménagement avec des coûts moindres que les autres types d'investissement relatifs au problème d'implantation. Konz (1985) évalue que la majorité des projets d'implantation en usine est relative à un réaménagement.

Aussi, il est possible d'utiliser les modèles de conception d'implantation dans le but de connaître l'aménagement idéal pour la production actuelle et d'en déduire certains changements à apporter face à l'implantation existante.

La majorité des modèles et des méthodes est axée sur le type d'implantation par blocs. L'implantation de type épine dorsale est un sujet de plus en plus considéré dans la littérature. Les modèles et les méthodes permettant la gestion des couloirs sont généralement associés à ce type d'implantation. Effectivement, pour les cas où les départements sont de mêmes dimensions et où les sites potentiels sont prédéfinis, il est possible de déterminer, dès le départ, la forme de l'implantation désirée (par blocs, épine dorsale ou autre). Seulement quelques modèles ou méthodes, tels que ceux développés par Houshyar et McGinnis (1990) et par Langevin et al. (1991-1994), ont été conçus spécifiquement pour le problème d'implantation à épine dorsale.

En ce qui a trait à la sélection de l'équipement de manutention, seulement quelques algorithmes retrouvés dans la littérature incluent ce choix lors de la construction d'une implantation. Pour la plupart des méthodes, les équipements de manutention en service sont identifiés lors d'une autre étape d'analyse, qu'elle soit préliminaire ou postérieure.

La quasi totalité des modèles et des méthodes analysés utilisent des normes de distance rectilinéaires et mesurées de centroïde à centroïde des départements. Il est entendu que les algorithmes comportant des postes d'entrée/sortie calculent les distances associées à celles-ci. Les distances réelles ne sont applicables que dans les cas où les couloirs de circulations sont préétablis. Des exemples de modèles et de méthodes utilisant des mesures réelles de distances sont associés au type d'implantation à épine dorsale.

Les méthodes exactes d'optimisation sont les seules classes de méthodes pouvant garantir des résultats optimaux. Pour tous les autres classes, les auteurs tentent d'établir les bornes inférieure et supérieure de la solution optimale d'un problème étudié dans le but d'évaluation des résultats du modèle ou de la méthode présenté et de comparaison avec les résultats tirés de la littérature. De façon générale, chaque modèle ou méthode d'approximation ne génère qu'une solution finale unique. Cependant, une particularité de certaines classes, telles que le recuit simulé, la recherche tabou et les algorithmes génétiques, est la production d'un ensemble de solutions intermédiaires parmi lesquelles la solution finale est sélectionnée. Ce processus de sélection peut être unique ou itératif, selon l'algorithme développé.

Les formes de l'édifice et des départements sont très variables. Une méthode répandue, pour des problèmes comportant des départements de dimensions inégales, est la définition du contour extérieur du bâtiment. Aussi, la représentation continue est utilisée, celle-ci permettant la génération de départements de formes régulières. Dans tous les cas, la forme sélectionnée est rectangulaire. Pour ce qui est de la silhouette des départements, certains modèles et méthodes limitent leur degré de variabilité. Les contraintes départementales de dimensionnement peuvent être associées à un nombre limite de coins, à un ratio maximal de la longueur sur la largeur, et ainsi de suite.

Des modèles et des méthodes utilisant la programmation linéaire ou la théorie des graphes et certaines heuristiques d'implantation permettent l'établissement d'un réseau de couloirs. Ce paramètre est en relation directe avec le type d'implantation le plus couramment généré, soit l'implantation par blocs. L'avancement de la recherche par rapport à l'élaboration d'algorithmes pour diverses formes d'implantation implique nécessairement une gestion des allées de circulation.

De la même façon, la localisation des postes d'entrée/sortie est associée à des modèles de programmation linéaire, à des heuristiques d'optimisation (recuit simulé, recherche tabou et algorithme génétique) ainsi qu'à certaines autres heuristiques d'implantation. Malgré le réalisme de cet aspect de la modélisation d'implantation, celui-ci est encore peu abordé dans la recherche.

Moins de cinquante pour-cent des auteurs utilisent des problèmes-types tirés de la littérature pour des fins d'évaluation des résultats obtenus avec leurs modèles ou méthodes, et de comparaison avec les autres modèles et méthodes. Aussi, l'application des problèmes-types de Nugent et al. (1968) est parfois incomplète. Il est donc impossible de comparer de façon globale l'efficacité de résolution d'un modèle ou d'une méthode. Plusieurs algorithmes font référence à des problèmes d'implantation ayant un plus haut degré de complexité (par exemple le type de donnée considéré, la variabilité des dimensions des départements, le calcul de la distance interdépartementale) que celui des problèmes de Nugent et al. (1968). Il serait donc profitable d'établir un ensemble de problèmes-types, provenant idéalement d'entreprises manufacturières, le plus complet possible. Par exemple, ce recueil pourrait inclure des départements de dimensions

variables, des flux stochastiques et ce pour quelques périodes consécutives, divers liens orientés, et autres caractéristiques. Par ailleurs, il est important de souligner le rôle significatif du facteur de la dominance de flux de tout problème utilisé pour l'évaluation d'un modèle ou méthode. La dominance de flux est associée à l'importance relative du flux de circulation entre deux points par rapport à toutes autres paires de points. Das (1993) résume bien le problème en affirmant que le degré de difficulté de résolution d'un problème d'implantation d'usine est inversement proportionnel au degré de dominance des flux de circulation. Par exemple, un problème ayant des flux de même intensité pour toutes les combinaisons de points est plus difficile à résoudre qu'un problème avec un ou quelques flux dominants.

Deux points sont donc à retenir lors de la sélection de problèmes-types pour l'évaluation d'un modèle ou méthode de construction ou d'amélioration d'implantation :

- 1) des données initiales nécessitant un minimum de modifications,
- 2) pour un même énoncé d'un problème, divers scénarios de données de flux ayant un facteur de dominance variable.

Les travaux de Raoot et Rakshit (1993), complétant ceux de Bozer et al. (1991), sont associés à l'élaboration d'une procédure de localisation établissant l'ordre de sélection des espaces de l'implantation à générer, soit la technique de courbes de remplissage des espaces. Cette technique comporte diverses procédures systématiques de localisation des activités. Quelques unes de ces procédures sont plus complexes que les algorithmes présentés à l'intérieur de diverses méthodes d'implantation d'usine (tel que certaines méthodes d'analyse multicritère, certains algorithmes interactifs ou certaines heuristiques). Il serait donc intéressant d'appliquer ces procédures, par exemple les méthodes oscillatoires en x, en y et combinée, à des algorithmes existants et de comparer les résultats obtenus avec ceux générés initialement par l'algorithme.

Tableau 2.3 Résumé des modèles et des techniques en fonction des paramètres étudiés

PARAMÈTRES D'ANALYSE	1.1	1.2	2.1	2.2			2.3		2.4	3	4
				i)	ii)	iii)	i)	ii)			
1. Données initiales											
i) Déterministes vs Stochastiques	D	D	D	D	D	D	D	S	D/S	D	D
ii) quanTitatives vs quaLitatives	T	T	T/L	T	T/L	T	T/L	T/L	T/L	T/L	T
iii) liens Non orientés vs Orientés	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
iv) dimensions Unitaires vs Fixes vs Variables	V	V	V	F	F	V	F	V	V	V	F
v) restriction de localisation	+	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-
vi) orientation particulière	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-
vii) 1 étage vs Multiétage	M	I	M	M	I	M	I	I	M	I	M
viii)couloirs prédéterminés	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+
2. Caractéristiques des méthodes utilisées											
i) Construction vs Amélioration	C	C	C	C/A	C/A	C	C/A	C	C/A	C/A	C/A
ii) Statique vs Dynamique	S	S	S	S	S	D	S	S	S	S	S
iii) Blocs vs à Épine dorsale vs Autres	B/É	B	B	B	B	B/É /A	B/A	B	B/É	B/É	B
iv) équipement de manutention	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-
v) Euclidiennes vs rectiLinéaires vs Réelles	E/L /R	R	E	L/R	L/R	L	L	L	L	R	L
vi) Centroïde à centroïde vs Autres	C/A	C/A	C	C	C/A	C	C	C	C	C	C
3. Résultats											
i) nombre de solutions (X) vs Optimalité	Opt	Opt	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ii) forme du bâtiment : Irrégulière vs Régulière	R	I	R	I	I	I	R	R	R	nil	R
iii) forme des départements : Irrégulière vs Régulière	R	R	R	R	I/R	R	R	R	R	R	R
iv) Sans couloir vs Avec couloirs	A	S	S	S	S/A	A	A	A	A	A	A
v) postes d'entrée/sortie	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-

Tableau 2.3 Résumé des modèles et des techniques en fonction des paramètres étudiés (suite)

PARAMÈTRES D'ANALYSE	1.1	1.2	2.1	2.2			2.3		2.4	3	4
				i)	ii)	iii)	i)	ii)			
4. Tests effectués											
i) problèmes-types utilisés : données de Nugent et al. (1968), Autre auteurs, Générées	G/A	G	nil	N/A	N/G	N/A /G	G	G	N/A	G	nil

Légende :	1- Méthodes exactes d'optimisation	2.3- Intelligence artificielle
	1.1- Programmation mathématique	i) Systèmes experts
	1.2- Évaluation & séparation progressive	ii) Théorie des ensembles flous
2- Heuristiques		2.4- Autres heuristiques
2.1- SLP de Muther		3- Théorie des graphes
2.2- Heuristiques d'optimisation		4- Simulation & théorie des files d'attente
i) Recuit simulé		
ii) Recherche tabou		
iii) Algorithmes génétiques		

2.7 Conclusion

Une revue générale du problème de conception et d'amélioration d'implantation d'usine a été présentée. L'établissement d'indicateurs de performance est basé sur les différents constats par rapport aux paramètres considérés dans la littérature et ceux associés à des problèmes concrets. Cette revue est axée sur quatre thèmes d'analyse : les données initiales, les caractéristiques des modèles et des méthodes, les types de résultat ainsi que les tests effectués pour la validation des modèles et des méthodes.

L'analyse en fonction des quatre thèmes permet de regrouper les modèles et les méthodes selon des caractéristiques communes et ainsi d'en tirer diverses conclusions. Par exemple, très peu incluent des relations interdépartementales de type orienté. Les retours en arrière, élément qui a une influence directe sur la productivité de l'entreprise, ne sont pas du tout considérés. Cette simplification de la problématique d'implantation ne favorise pas l'établissement de modèles ou méthodes permettant la résolution adéquate de problèmes concrets.

La plupart des modèles et des techniques génèrent des solutions en deux dimensions. Seulement certains d'entre eux, tels quels ou avec modifications mineures, peuvent gérer l'option d'espace en trois dimensions. Cette option peut être associée à de l'entreposage à la verticale, à l'utilisation de mezzanines, au transport aérien des produits, ou autres. Contrairement aux hypothèses simplificatrices du système manufacturier, ces diverses situations de production ne sont pas rares en entreprises de production.

Tel qu'établi, moins de la moitié des classes évaluées inclut un algorithme d'amélioration d'une implantation, ce qui est peu réaliste puisqu'une grande partie des aménagements d'usine implique seulement la modification d'une implantation existante. Aussi, une importante proportion des modèles et des techniques présentés sont axés sur un type d'implantation par blocs. Cependant, les couloirs de circulation, essentiels à tout type d'implantation, ont une influence significative sur la qualité de la solution.

Dans un même ordre d'idées, peu de modèles et de méthodes considèrent la relation fondamentale entre le type d'implantation et le réseau des couloirs de circulation à considérer. Les réseaux de circulation habituellement générés sont de type par blocs et seulement quelques auteurs traitent des problèmes d'implantation à épine dorsale.

Finalement, l'homogénéité quant à l'évaluation de modèles et de techniques élaborés est à questionner. Plusieurs auteurs utilisent les problèmes-types de Nugent et al. (1968). Cependant, ces données ne sont pas adaptées au degré de complexité des algorithmes qui ont été développés au fil des années. Aucune banque complète de problèmes n'est proposée dans le but d'uniformiser l'utilisation de données pour l'évaluation des modèles et des techniques de résolution de problèmes d'implantation.

Ce ne sont là que quelques conclusions tirées de cette analyse des diverses classes de modèles et de méthodes. L'atteinte du premier objectif d'identification d'indicateurs de performance pour l'évaluation d'une implantation nécessite, au préalable, la définition du cadre d'application de ces indicateurs. Le chapitre suivant propose donc une démarche pour la sélection des éléments représentatifs du système de production à l'étude.

CHAPITRE 3

IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS-TYPES ASSOCIÉS AUX INDICATEURS DE PERFORMANCE DE L'IMPLANTATION

3.1 Introduction

L'identification des éléments-types représentant les points critiques du système de production est une étape préliminaire à l'analyse ponctuelle de l'implantation. Une fois l'implantation référentielle déterminée et l'objectif d'analyse ciblé, certains éléments-types sont sélectionnés pour leur évaluation à l'aide d'un sous-ensemble d'indicateurs de performance. La méthode d'analyse proposée est basée sur les concepts de possibilité et de nécessité de remise en question associés à la sélection des éléments représentatifs de la production.

Un élément-type est défini comme étant une composante du système, tel qu'un produit ou une famille de produits, un équipement de production, un élément de manutention ou un type de gestion de production, caractérisant une partie de la production sur laquelle notre attention est portée. La détermination des éléments-types est une étape décisive pour l'application efficace des indicateurs de performance élaborés. Par conséquent, si la sélection des éléments-types n'est pas adéquate, les résultats obtenus ne peuvent être concluants et peuvent même mener à des décisions de réaménagement très coûteuses. Par exemple, la sélection d'un produit à l'état de fin de maturité, dans sa courbe de cycle de vie, aura pour conséquence une implantation potentiellement désuète à court terme. Il y aura donc nécessité de reprendre le processus de réévaluation de l'implantation et, conséquence probable, de revoir l'implantation. Des changements associés à la demande pour chacun des produits, aux procédés de fabrication, aux méthodes de manutention, à un réaménagement partiel ou complet, de même qu'au type de gestion préconisé peuvent affecter la sélection des éléments-types puisque la liste des éléments représentatifs est **variable en fonction du temps**. En effet, un système dynamique tel celui de la production manufacturière est difficilement représenté par un sous-ensemble statique d'éléments. Il est nécessaire que ce sous-ensemble évolue en concordance avec le système étudié. Il est donc

important de remettre en question de façon périodique la pertinence de l'un ou l'autre des composantes inclus dans la liste d'éléments-types.

Un objectif à garder en mémoire lors de la sélection est la restriction du nombre d'éléments-types choisis. La quantité d'informations redondantes nuit à une analyse claire et efficace du système de production. Cependant, cette simplification doit demeurer réaliste. Il revient à l'analyste de déterminer les éléments-types représentant le plus adéquatement possible le système manufacturier étudié.

Galbraith et Miller (1990) définissent trois composantes d'un système de production : les produits, la séquence des opérations, et les procédés. Aussi, Kouvelis et Kiran (1991) proposent trois types de changement influençant la production : une variation de la structure de produits à fabriquer, une variation de la séquence d'opérations, et les différentes possibilités de gammes de fabrication. Il est possible de généraliser ces notions pour obtenir les trois thèmes définis par Muther (1973) qui sont : les **produits**, les **équipements de production**, et le **système de manutention**. De façon complémentaire, le système de manutention est détaillé en spécifiant qu'il est associé aux équipements utilisés et au réseau de couloirs de circulation. Aussi, un quatrième thème, les politiques de **gestion de production**, permet de compléter la dynamique d'un système manufacturier.

De façon délibérée, les informations relatives aux employés de production et la manutention secondaires sont omises dans notre analyse. Ces critères se retrouvent, de façon indirecte, dans l'évaluation d'autres paramètres. Par exemple, considérant que la gestion du personnel est adéquate initialement, toute modification dans la charge de travail des employés de production est l'origine ou la conséquence de la variation d'éléments comme la demande, les procédés de transformations, l'horaire de travail, et autres. Pour sa part, la manutention secondaire fait référence aux mouvements des rejets et des rebuts. Règle générale, un suivi de ces éléments est l'une des principales responsabilités du contrôle de qualité. Aussi, une variation notable de ces types de déplacement se répercute sur les éléments de manutention, contribuant à la variation des indicateurs de performance associés.

Pour chacun des thèmes détaillés dans les pages qui suivent, une description et des exemples de critères favorisant une sélection judicieuse des éléments-types associés au cas particulier étudié sont présentés. Chaque critère proposé est associé à l'un des indicateurs de performance de l'implantation élaborés au chapitre suivant. Le choix d'un élément-type repose sur deux domaines d'analyse : sa représentativité et sa spécificité. La **représentativité** est associée au concept de la loi de Pareto. En effet, le descriptif de la production peut être agrégé en n'incluant que ses principaux éléments. De façon implicite, tous les autres éléments sont englobés dans cette simplification du système. La notion de **spécificité** fait référence à un élément mettant en évidence un aspect du système de production étudié. La sélection des éléments-types doit nécessairement considérer ces deux aspects d'analyse du système manufacturier.

3.2 Produits

Ce thème se compose des principaux produits de fabrication et des produits spéciaux. Dans le premier cas, la loi de Pareto peut être applicable. Elle est généralement utilisée dans un but de simplification de l'analyse en minimisant le nombre de produits évalués et en gardant un modèle de production réaliste. Tel que défini par Nichol et Hollier (1983), le remplacement de plus du tiers des produits par d'autres n'étant pas de la même famille implique une révision de l'implantation. Cette définition subjective a été acceptée par la majorité des entreprises faisant partie de leur enquête. Pour le second cas, les produits spéciaux, les caractéristiques particulières sont de différente nature pour chaque problème étudié, par exemple la gamme de fabrication et les caractéristiques physiques.

La séquence de production (ou la gamme) d'un produit est définie comme étant l'énumération ordonnée de toutes les opérations à effectuer pour sa fabrication et non, telle qu'établie par plusieurs auteurs, des équipements de production utilisés. Ainsi, la définition de la séquences des opérations d'un produit englobe toutes les variantes d'utilisation des équipements de fabrication. Cette hypothèse de travail est utilisée par Atmani et al. (1995). Ils considèrent une variabilité temporelle de la sélection des équipements de production pour la fabrication d'un produit particulier. Aussi ils estiment que, pour une gamme particulière, l'affectation

d'opérations à des machines est fonction de la combinaison de produits et du volume de production.

Tel que réitéré par Ho et al. (1993), les produits sont habituellement gérés par familles de produits. Le regroupement permet de réduire de façon significative la quantité d'informations à considérer. Les critères présentés pour la sélection des éléments-types est applicable aux familles de produits définies précédemment. À l'intérieur d'une famille, seulement un ou quelques produits représentatifs sont considérés lors de l'analyse, toujours dans un but de simplification du système manufacturier. Règle générale, le produit sélectionné est celui associé à la principale production de la famille. Cependant, pour le cas d'une famille regroupant un grand nombre de produits, il est plausible que le produit identifié puisse être relié à une production secondaire. Dans ce cas particulier et selon l'objectif de l'analyse, il est peut-être préférable d'inclure plus d'un produit de cette famille dans la liste des éléments-types.

Le degré de complexité de la gamme d'un produit est un autre critère à considérer. L'analyse de la gamme peut être orientée de diverses façons. Le nombre d'activités à effectuer est le critère le plus utilisé. De façon complémentaire, le niveau de valeur ajoutée doit faire partie de cette évaluation. Un exemple typique est la fabrication de matrices pour le domaine des poudres métalliques, comparativement à la fabrication de carrosseries. Dans le premier cas, la gamme de fabrication consiste en quelques activités telles que l'usinage proprement dit, la finition de surface et le nettoyage. À elle seule, l'activité d'usinage peut nécessiter plus de vingt heures en temps-machine. Le niveau de la valeur ajoutée est donc très important. Dans le second cas, plusieurs phases sont en cause : détournage, découpage, poinçonnage, ébavurage, pliage, et autres. Le temps total de transformation varie en fonction du dessin de définition de la pièce, soit par exemple de quatre à cinq heures de travail. Ainsi, la valeur ajoutée est de niveau inférieur même si les opérations sont plus nombreuses que pour l'usinage de matrices.

Des modèles, tels que ceux de Rosenblatt et Lee (1987) et de Yaman et al. (1993), font référence à un environnement stochastique de la demande. Pour une période particulière, le modèle de Rosenblatt et Lee (1987) définit la demande par produits pour un ensemble de scénarios (pessimiste, réaliste et optimiste) auxquels des probabilités sont associées. Le modèle

de Yaman et al. (1993) est basé sur l'évaluation de différentes combinaisons de produits. Pour un produit particulier, leur modèle suit une logique qui est fonction de sa courbe de vie commerciale. Celle-ci peut donc être un autre facteur décisif dans la sélection des produits comme éléments-types. En effet, le statut actuel d'un produit (lancement, croissance, maturité, déclin ou valeur résiduelle) a une influence directe sur la production actuelle et prévisionnelle du produit. La croissance de la demande d'un produit jusqu'à maturité peut imposer une fabrication par produits, tandis que le déclin d'un produit ne justifie peut-être plus la mise en cellule d'équipements de production pour la transformation de ce seul produit. Pour une famille de produits, la sélection d'un produit en période de fin de croissance ou en début de maturité devrait être préconisée.

Le type de demande (saisonnière, uniforme, variable), le pourcentage du volume de production d'un produit par rapport à la fabrication totale et le niveau de qualité sont des exemples de critères pouvant aussi être analysés lors de la sélection des éléments-types associés aux produits.

Le tableau 3.1 résume les différents aspects d'analyse présentés pour ce thème. Le premier indicateur de performance proposé au chapitre 4, le ratio de quantité à fabriquer, englobe les aspects relatifs à la variation de la demande (1, 5, 6, 7, 8) et à la représentativité de la famille (3). Le second indicateur de ce thème, le ratio de procédé de fabrication, fait référence aux variations associées à la gamme de fabrication (2, 4).

Tableau 3.1 Aspects d'analyse pour les produits

- | |
|---|
| 1) Loi de Pareto |
| 2) Séquence des opérations |
| 3) Regroupement par familles de produits |
| 4) Degré de complexité d'une gamme |
| 5) Environnement stochastique de la demande |
| 6) Type de demande (saisonnière, uniforme, etc.) |
| 7) Pourcentage du volume de production d'un produit vs la production totale |
| 8) Niveau de qualité |

3.3 Équipements de production

Les éléments-types retrouvés dans ce thème sont les équipements d'utilisation fréquente ou de grande flexibilité. Pour minimiser les effets négatifs sur le rendement de l'implantation, le niveau de contrôle de la gestion de la production est directement proportionnel au taux d'utilisation des machines. Une machine dite de service qui est peu utilisée et pour laquelle le nombre d'en-cours en attente est quasi nul nécessite peu de supervision. À l'opposé, un équipement ayant un haut taux d'utilisation nécessite une gestion efficace dans le but ultime de minimiser les conséquences néfastes sur la production. Ces conséquences peuvent prendre la forme d'un retard dans l'horaire de production, d'une hausse des en-cours, d'un engorgement des allées de circulation, d'une hausse du coût de revient d'un produit particulier, et autres. L'analyse du niveau d'utilisation d'un équipement de production doit aussi considérer la variété de produits transformés à ce poste de travail et les temps de mise en course internes (non masqués) entre deux différentes séries de production.

La flexibilité de production est reliée à la quantité de différentes opérations qu'un équipement peut exécuter. Un équipement de grande flexibilité rend possible l'option d'une modification de cheminement lors de l'engorgement d'une machine. À l'opposé, l'arrêt d'un équipement dit flexible fait dévier plusieurs produits vers de nouvelles routes. La gestion de ces changements de cheminement est importante, toujours dans un but de minimisation des effets négatifs sur la production. Aussi, un équipement flexible est, règle générale, plus dispendieux en fait de coûts d'investissement qu'un équipement dédié à une ou quelques tâches particulières. Il est donc usuel d'utiliser de façon maximale cet équipement, parfois au détriment de la productivité générale du système.

Certains types d'équipement peuvent être inclus dans le sous-ensemble d'éléments-types selon des caractéristiques particulières. Parmi ces critères, l'analyste peut entre autre considérer : le niveau de disponibilité d'un équipement (en tenant compte des arrêts pour panne, bris et entretien), le niveau de qualité des produits transformés, évalué à l'aide des taux de rejets et de rebuts, le degré maximal de précision, et le coût horaire de fonctionnement d'un équipement.

Dans un autre ordre d'idées, Nichol et Hollier (1983) affirment que la révision de l'implantation doit être initiée lorsque plus du tiers des équipements de production ont été remplacés ou repositionnés. Ainsi, l'état du parc-machines, soit le nombre de machines de chaque type et leur localisation (par exemple pour une implantation par procédés), doit être monitoré, toujours dans un but d'évaluation de l'implantation.

Le tableau 3.2 présente tous ces aspects d'analyse. Le taux de fonctionnement, premier indicateur de ce thème, est relatif au taux d'utilisation (1) et à la disponibilité opérationnelle (3) d'une machine. Le second indicateur, le ratio de dispersion des équipements, traite du niveau de dispersion des équipements de production (7) à l'intérieur du secteur de production. Le paramètre relatif aux différentes gammes de fabrication (2, 5, 6) est détaillé à la section précédente. En effet, les questions de flexibilité et de degré maximal de précision d'un équipement sont prises en compte lors de l'énumération des possibilités de gammes de transformation d'un produit. Aussi, tel que mentionné, le degré de rejets et rebuts (4) n'est pas traité de façon directe puisque les effets se reflètent sur d'autres paramètres étudiés. L'établissement des coûts horaires de fonctionnement influence directement la politique d'affectation des opérations, thème aussi discuté à la section 3.2 Produits.

Tableau 3.2 Aspects d'analyse pour les équipements de production

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1) Utilisation fréquente 2) Flexibilité 3) Niveau de disponibilité de l'équipement 4) Niveau de qualité des produits transformés 5) Degré maximal de précision 6) Coût horaire de fonctionnement 7) Remplacement ou repositionnement |
|--|

3.4 Système de manutention

Tel que mentionné précédemment, il est proposé de diviser ce thème en deux catégories : les équipements de manutention, et le réseau de couloirs de circulation. Comme pour les

équipements de production, le taux d'utilisation, la flexibilité, le niveau de disponibilité d'un équipement et le coût horaire de fonctionnement sont des paramètres associés à l'emploi d'équipements de manutention et influençant la performance de l'implantation.

La flexibilité est définie comme étant fonction du degré de latitude face au nombre de postes de travail desservis ou face au nombre de produits manutentionnés par un type particulier d'équipement. Pour diverses entreprises, les méthodes de manutention sont standardisées par l'emploi d'accessoires de préhension adaptés aux équipements permettant ainsi d'augmenter la flexibilité et de minimiser le nombre de types d'équipement de manutention.

Les équipements de manutention traités sont ceux n'appartenant pas à l'ensemble des équipements dits fixes, par exemple un transporteur à rouleaux, un convoyeur au sol ou aérien. Règle générale, les équipements dits fixes sont dédiés à la manutention d'un ou de types particuliers de produit ou, dans d'autres cas, dédiés pour tous les produits utilisant une route particulière. Le taux d'utilisation de ces équipements est facilement estimé puisqu'il est directement relié au niveau de production de ces quelques produits, ou au taux de production des activités situées en amont de la chaîne. Un cas particulier est lorsque le cheminement de la pièce, utilisant un équipement de manutention fixe, est interrompu pour une opération ou une série d'opérations. Dans ce cas, les opérations hors chaîne peuvent être considérées dans l'analyse si elles sont qualifiées d'éléments-types. Ainsi, il n'est pas nécessaire de faire le suivi de ces équipements étant donné qu'une évaluation périodique des produits ou des machines associées est concluante quant à leur utilisation.

La capacité des couloirs de circulation étant limitée, dû à des restrictions physiques, il peut être nécessaire d'évaluer de façon périodique la densité de flux sur certains segments d'allée. En effet, l'engorgement d'un segment d'allée peut directement influencer les performances de productivité de l'entreprise, par exemple en retardant l'arrivée de pièces à un poste de travail.

Pour la mesure de performance d'une implantation, Hassan (1994) propose l'utilisation de bornes supérieure et inférieure des coûts de manutention et de retours en arrière, et la comparaison des relations qualitatives de l'implantation actuelle en fonction de l'idéal. Comme

pour tous les algorithmes, les coûts sont directement proportionnels aux déplacements des produits et à leur orientation par rapport au cheminement global de la production. Les relations qualitatives, pour leur part, peuvent être associées à différents critères tels que ceux définis par Cambron et Evans (1991) : le contrôle du bruit, l'efficacité de supervision, la sécurité, le côté esthétique et autres. L'importance du respect de l'un ou l'autre de ces critères influence l'évaluation de l'implantation.

Le réseau de couloirs de tout type d'entreprise est divisé en deux parties, soit les allées principales et les allées secondaires. Ces définitions sont associées essentiellement à la densité de flux et au nombre d'activités desservies par allées. En entreprises, il est fréquent de constater l'usage de couloirs secondaires dans un but d'isolement d'une activité. Les entrepôts de matières premières et de produits finis, la peinture, des procédés particuliers tels que les traitements thermiques, les bains de nettoyage ou de trempe, sont des exemples d'activités pouvant être situées sur des couloirs secondaires de type cul-de-sac. Le niveau d'achalandage d'allées secondaires étant directement relié à un nombre minimal d'activités, celui-ci est facilement calculable en se basant sur les taux d'utilisation des équipements de production localisés sur ces segments. Ainsi, la sélection d'éléments-types sera généralement associée à des allées principales de circulation sur lesquelles le degré d'interrelation entre les activités est important. Un contre-exemple est un segment d'allée dédié à une production par produits. Pour ce cas particulier, la circulation des produits en-cours est essentiellement linéaire, soit l'activité j en relation avec deux activités seulement, les activités $j-1$ et $j+1$.

Le niveau d'engorgement d'un segment d'allée doit être analysé sous deux angles complémentaires, l'évaluation sectorielle et l'évaluation pondérée. Pour chacun, les effets sur la production et les mesures correctives à instaurer ne sont pas du même ordre. La gestion de la production peut permettre une redistribution des charges de travail dans un but d'uniformisation de la circulation par rapport à l'intervalle de temps productif du système manufacturier. En contrepartie, un taux de circulation élevé nécessite une analyse des causes et des solutions envisageables pour remédier à la situation.

Chhajed et al. (1992) présentent des paramètres définissant les déplacements dans un réseau. De cet ensemble, la direction et le niveau de redondance du réseau de couloirs sont étudiés puisque leurs variations ont des répercussions sur la performance de l'implantation. La direction est associée à l'orientation, uni- ou bidirectionnelle des déplacements sur un segment particulier. La gestion d'un segment d'allée comportant des déplacements dans les deux sens est plus complexe et souvent, dans ce cas particulier, la performance du système est plus sensible à une variation du degré d'engorgement. La redondance est associée aux itinéraires viables pouvant être sélectionnés pour les manutentions d'un point à un autre. Lors d'une augmentation du niveau de circulation, la redondance reliée aux segments d'allée permet de désengorger les segments critiques. De façon intrinsèque, certaines formes d'implantation, dites en réseau bouclé comme la forme en O ou en 8, rendent possible l'établissement d'autres chemins entre les activités. La figure 3.1 présente des formes primaires de réseaux de couloirs. En entreprises, la structure du réseau de couloirs tire toujours son origine de l'une ou l'autre de ces formes, ou d'une combinaison de celles-ci. Quelques exemples observés en usines sont schématisés à la figure 3.2 où la forme primaire dominante du réseau de couloirs est aussi identifiée.

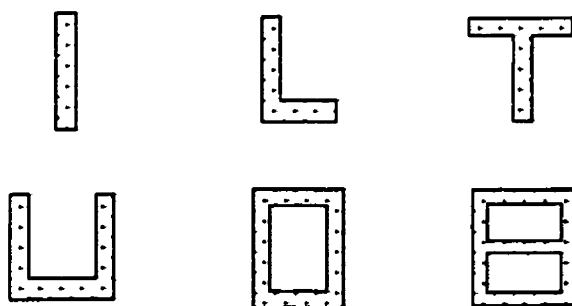


Figure 3.1 Diverses formes primaires de réseaux de couloirs

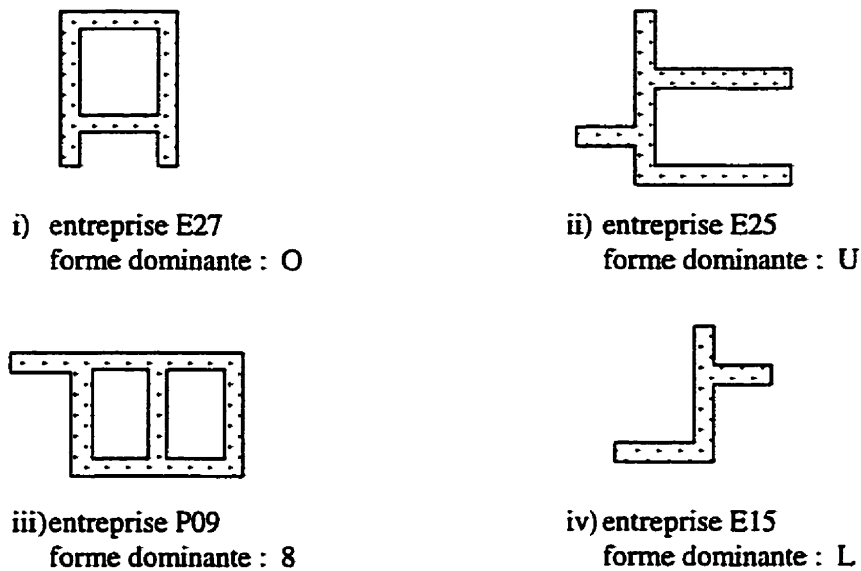


Figure 3.2 Exemples de réseaux de couloirs retrouvés en entreprises

Le tableau 3.3 présente les différents critères de sélection d'éléments-types combinés aux paramètres d'évaluation de l'implantation proposés au chapitre 4. Le ratio de distance, relatif à la mesure des distances parcourues (6), est établi pour un produit ou pour une famille de produits. Un second indicateur de ce thème est associé à l'évaluation des retours en arrière selon la direction générale du flux de circulation (7, 10). Le ratio de manutention, pour sa part, est associé au taux d'utilisation de l'équipement de manutention en fonction de sa capacité réelle de fonctionnement (1, 3). Le dernier indicateur associé à la manutention est le ratio d'engorgement. Il est défini par la densité de flux sur les segments d'allée (5, 9, 11). L'évaluation périodique de l'implantation peut être fonction de l'engorgement sectoriel ou de l'engorgement pondéré du réseau de couloirs de circulation. Les différentes possibilités de cheminement des pièces influencent directement l'engorgement sectoriel. Comme pour les équipements de production, la flexibilité (2) et le coût horaire des équipements de manutention (4) font référence à d'autres critères d'analyse déjà retenus pour l'évaluation de l'implantation. Pour ce qui est des critères qualitatifs (8), des notions d'ergonomie peuvent être appliquées. Aussi, la gestion de production englobe les critères qualitatifs énumérés ci-haut.

Tableau 3.3 Aspects d'analyse pour le système de manutention

- | |
|--|
| 1) Taux d'utilisation des équipements |
| 2) Flexibilité des équipements |
| 3) Niveau de disponibilité des équipements |
| 4) Coût horaire de fonctionnement |
| 5) Densité de flux sur les segments d'allée |
| 6) Coût de manutention |
| 7) Retours en arrière |
| 8) Relations qualitatives par rapport à l'idéal |
| 9) Engorgement sectoriel et pondéré d'un segment d'allée |
| 10) Direction générale du flux |
| 11) Redondance de flux |

3.5 Gestion de production

La gestion de production est un élément qu'aucun auteur, à notre connaissance, n'inclut à titre de composante associée à l'analyse de l'implantation. Les différents modèles et techniques présentés au chapitre 2 utilisent pour la plupart des données de type quantitatif comme les distances parcourues, les coûts de manutention et de réaménagement, ou de type qualitatif comme les relations par paires d'activités ("closeness rating"). Les modèles de génération d'implantation sont pour la plupart associées à l'un ou l'autre des objectifs suivants ou à une combinaison de ceux-ci :

- 1) Minimisation des coûts de manutention intercellulaire ou globale,
- 2) Minimisation des coûts de réaménagement,
- 3) Minimisation des durées de manutention,
- 4) Minimisation des distances,
- 5) Minimisation des retours en arrière,
- 6) Maximisation des profits,
- 7) Maximisation de l'utilisation des espaces,
- 8) Maximisation des relations par paires d'activités,
- 9) Maximisation du respect de la séquence des opérations.

De plus, des contraintes relatives au dimensionnement et au positionnement des activités peuvent restreindre la localisation d'activités à des secteurs particuliers de l'implantation, par exemple les contraintes de zonage introduites par Kouvelis et al. (1992).

Des techniques, telles que celles basées sur la théorie des systèmes experts et la théorie des ensembles flous, utilisent des critères qualitatifs pour l'évaluation de l'implantation : le bruit, l'esthétisme, la sécurité, le degré de satisfaction de besoins spécifiques, des considérations environnementales, et autres. El-Rayah et Hollier (1970) et Cambron et Evans (1991) proposent d'autres critères quantitatifs et qualitatifs d'évaluation de l'implantation générée. La liste de critères proposés par Muther (1973) présentée en annexe 1 complète l'énumération de paramètres pouvant influencer la performance de l'implantation. De ces critères, l'utilisation de l'espace, l'adaptabilité de l'implantation en fonction de la structure organisationnelle de l'entreprise et le niveau de sécurité de l'entreprise sont considérés relatifs à la gestion de production.

Selon la définition de leur domaine d'applicabilité, les modèles et les méthodes de conception et d'amélioration d'implantation présentés dans la littérature sont orientés vers la génération d'une implantation optimale pour une série particulière de données. Les différentes politiques de gestion préconisées par l'entreprise influencent ces données. Cependant, les auteurs considèrent ces données connues a priori, et ce même dans un environnement dynamique. De façon implicite, la variation des politiques de gestion est prédéfinie en fonction du système étudié et selon les périodes de production analysées. Une modification de la gestion de production peut prendre la forme de :

- 1) l'application de nouveaux critères de gestion, par exemple la minimisation des déplacements des employés, telle que préconisée dans un environnement cellulaire en U;
- 2) un changement d'orientation de l'entreprise relatif à la gestion des stocks, par exemple l'application de la méthode du juste-à-temps;
- 3) l'introduction de la notion de maintenance productive totale qui vise à éliminer toutes sources de défaut.

Des variations plus subtiles de la gestion de production, associées aux prévisions de vente, à l'imputation des coûts de main-d'œuvre sur les produits finis, à la gestion des politiques de maintenance, influençant les heures effectives de production et autres, agissent aussi sur la performance globale de l'implantation.

Non seulement la gestion de production influence les données initiales, mais aussi la définition et même l'application des politiques propres à une entreprise sont variables dans le temps et influencent directement la qualité de l'implantation. Aussi, cette variation est non uniforme et inconnue initialement. Il est donc nécessaire de faire des évaluations périodiques de l'implantation dans le but d'identifier les conséquences sur l'implantation d'une modification, ne serait-ce que mineure, de l'une des politiques de gestion de production.

Nous considérons comme stables certains éléments de la gestion de production, et ce pour le moyen et même pour le long terme de l'entreprise, par exemple :

- 1) la taille de lots : unitaire, groupe de pièces ou production complète;
- 2) la gestion de production : de type "tirer" ou "pousser";
- 3) la politique de gestion des files d'attente aux postes de travail : FIFO, LIFO, minimum de temps-machines, délai de fabrication, etc.;
- 4) la gestion de la manutention : sur appel ou anticipation de la demande;
- 5) la politique de rangement : entrepôt dédié ou entrepôt aléatoire;
- 6) l'établissement du coût horaire de fonctionnement des équipements de production et de manutention.

Ces éléments font référence à l'interprétation classique des notions de gestion de production. D'autres critères comportent une notion de variabilité influençant la performance de l'implantation. Il peut donc être important, selon la stabilité réelle du système de gestion de l'entreprise, de faire un suivi périodique de certains éléments de ce sous-ensemble dans un but de détection du moment propice à la révision de l'implantation. Le tableau 3.4 présente différents aspects d'analyse associés à la gestion de production. Le premier indicateur défini pour ce thème, le ratio d'entreposage, permet le suivi de tout type d'entreposage des en-cours (1). Le ratio de l'horaire de travail (2) établit les temps productifs en fonction des standards de

l'entreprise. La politique d'affectation des tâches est discutée à l'étape d'évaluation des produits (3).

Tableau 3.4 Aspects d'analyse pour la gestion de production

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1) Gestion de la manutention : espaces d'entreposage officiels et non officiels 2) Politique d'horaire de travail 3) Politique de l'affectation des tâches et de la main d'oeuvre aux équipements |
|---|

3.6 Conclusion

Ce chapitre fait appel à un nouveau concept d'**éléments-types** utilisé pour l'application des indicateurs de performance de l'implantation proposés au chapitre 4. Selon ses caractéristiques et les objectifs d'analyse visés, toute entreprise doit déterminer un sous-ensemble d'**éléments-types** propres à ses activités de fabrication. Cette sélection fait appel aux notions de **représentativité** et de **spécificité** d'un élément par rapport à la production. Ces éléments-types sélectionnés sont donc utilisés pour l'évaluation périodique du système.

Il est proposé de décrire un système manufacturier à l'aide d'éléments représentatifs répartis sous quatre thèmes : **les produits, les équipements de production, le système de manutention et la gestion de production**. Pour chaque thème, divers critères de sélection sont présentés. Constatant une redondance de l'information relative aux employés de production et aux manutentions secondaires, celles-ci sont omises de l'analyse du système.

Pour chacun des thèmes traités, les divers critères de sélection des éléments-types proposés sont associés à un paramètre d'évaluation permettant de faire le suivi périodique de l'implantation. Les indicateurs de performance de l'implantation élaborés sont détaillés au chapitre suivant.

Il est important de garder en mémoire que la démarche d'analyse de l'implantation repose sur le constat que la représentativité de tout élément n'est pas immuable et qu'il est nécessaire de remettre en question de façon périodique les éléments-types sélectionnés.

CHAPITRE 4

INDICATEURS DE PERFORMANCE DE L'IMPLANTATION

4.1 Introduction

Comme défini par Nandkeolyar et al. (1993), une implantation possède, tel un produit, un cycle de vie qui lui est propre. La philosophie dynamique, définie par Rosenblatt (1986), est applicable. Comme il a déjà été dit, cette philosophie est orientée vers l'analyse multicritère d'une implantation. De plus, la durée d'une période est variable et inconnue a priori. De façon plus précise, le concept de stratégie réactive dans un environnement dynamique, développé par Montreuil et Venkatadri (1991), est préconisé. En effet, une hypothèse inhérente à la méthodologie proposée est que l'implantation initiale, sur laquelle se base l'évaluation des divers indicateurs proposés, est optimale selon les diverses contraintes du système. Basé sur ce référentiel, l'implantation sera actualisée de façon périodique dans un but d'adaptabilité par rapport aux besoins.

La détermination du moment propice à la révision d'une implantation, c'est-à-dire l'identification de la fin d'une période du cycle de vie de l'implantation, est basée sur l'évaluation de divers indicateurs de performance de l'implantation. Les pages suivantes incluent un survol de la littérature associé à l'établissement d'indicateurs de performance. Par la suite, différents indicateurs sont élaborés pour l'évaluation périodique de l'implantation. Comme pour les éléments-types définis au chapitre précédent, les indicateurs proposés sont divisés en quatre thèmes : les **produits**, les **équipements de production**, le **système de manutention** et la **gestion de production**. Aussi, comme réitéré par Neely et al. (1995), il est préférable d'utiliser des ratios pour l'établissement des indicateurs et le suivi de ces indicateurs devrait être de préférence sous forme graphique. Ces attributs caractérisent les indicateurs de performance élaborés.

Lors d'une analyse de la production, la sélection des paramètres significatifs pour le cas étudié est faite à partir des différentes catégories. Selon l'objectif visé, la combinaison de paramètres choisis est différente. La sélection de plusieurs indicateurs à l'intérieur d'une même

catégorie permet de faire un suivi attentif de la catégorie mise en relief. D'un autre côté, la sélection d'indicateurs associés à plusieurs catégories permet un suivi général du système manufacturier, toujours du point de vue de l'implantation. Par conséquent, il est important de bien identifier l'objectif visé avant la détermination des paramètres de production à analyser. Par exemple, l'objectif du département de contrôle de qualité peut être l'évaluation périodique de l'efficacité globale, contrairement au département de production pour lequel l'objectif principal est l'analyse du taux d'utilisation d'un ou de quelques équipements de production particuliers.

4.2 Revue de littérature

Tous les modèles et les méthodes pour la résolution du problème d'implantation présentés dans la littérature sont associés à la conception d'une implantation basée sur des données initiales déterminées, ou associés à l'évaluation de l'implantation actuelle dans un but de réaménagement. Comme souligné par Konz (1985), cette évaluation est d'autant plus importante que la majorité des projets d'implantation en usine sont associés à un réaménagement. Tel que réitéré par Tanguy (1995), l'accent doit être mis sur la nécessité d'une remise en cause périodique du système, et ce avant même l'utilisation de l'un ou l'autre des modèles ou méthodes. Une hypothèse inhérente à la recherche dans ce domaine est l'identification a priori de la nécessité de la révision de l'implantation pour l'application des modèles et des méthodes proposés. Lin et Sharp (1999b) mentionnent que l'évaluation du moment propice à la révision de l'implantation est une notion implicite pour tous les auteurs. Les citations suivantes démontrent bien cette affirmation.

"Periodic checks should be made to see that the layout is performing satisfactorily. Also, you should be on the lookout for the problem indicators... so that a redesign of the layout is begun when justified."

Francis et al. (1992)

"This static process is repeated whenever studying the revised expected requirements demonstrates that they deviate significantly from earlier expectations, or when some events such as equipment acquisition force management to consider re-layout."

Montreuil et Laforge (1992)

"... a manufacturer must alter the layout whenever the situation warrants."

Kochhar et Heragu (1999)

Aussi, Sule (1994) mentionne que les différents ratios de productivité présentés doivent être périodiquement contrôlés, et ce en fonction de tolérances acceptables, sans définition des intervalles de contrôle et du terme *tolérances acceptables*. Tous ces auteurs font partie d'un important groupe pour lequel l'établissement du moment propice à la révision de l'implantation n'est pas discuté plus en détail. La majorité des auteurs soulignent la nécessité d'établir des paramètres d'évaluation pour une implantation existante. Par contre, seulement certains d'entre eux se risquent à proposer des critères quantitatifs d'évaluation, généralement associés à la production. Pour l'ensemble des auteurs, aucun ne se penche sur la question d'élaboration d'une procédure de suivi particulière. Comme mentionné précédemment, notre recherche est axée sur cette lacune. L'élaboration d'indicateurs de performance étant le point central de la démarche proposée, les pages qui suivent présentent donc une revue de littérature sur le sujet.

Nandkeolyar et al. (1993) proposent trois dimensions associées à tout type de changement d'état du système manufacturier : le débit de production, les coûts et les taux d'utilisation. Les trois dimensions proposées par Aldanondo et Breuil (1993) sont : le temps, la qualité et les coûts. Pour ces deux équipes d'auteurs, aucun lien n'est établi avec la notion d'évaluation périodique de l'implantation et aucune équation n'est élaborée.

De façon plus détaillée, les travaux de Bassal et al. (1982) incluent un formulaire d'analyse permettant l'autodiagnostic de la productivité d'une entreprise. La majorité des critères sont évalués de façon qualitative. Pour les critères quantitatifs, leurs définitions ne permettent pas d'établir de lien avec la qualité de l'implantation. Il en va de même pour les critères proposés par Tompkins et al. (1996).

Une étude relative à 30 industries belges et publiée par Gelders et al. (1994) indique que les mesures de performance de production les plus utilisées, la plupart étant dites traditionnelles, sont :

- les temps de fabrication
- les temps de mise en course
- les taux d'utilisation des équipements
- les volumes de production/jour
- les volumes de production/employé
- les délais de fabrication
- les temps de développement d'un produit ou d'un procédé
- les taux de roulement de l'inventaire - matières premières et produits finis
- les rejets et les rebuts
- les bris et les pannes
- le rendement des matières premières
- les produits en-cours (WIP)
- la fiabilité de livraison

Aussi, certains modèles et méthodes de regroupements de produits en familles de produits (ou de machines en cellules) proposent des mesures d'évaluation. Harhalakis et al. (1990), Kumar et Chandrasekharan (1990), Verma et Ding (1995), Seifoddini et Djassemi (1996a et b) et Akright et Kroll (1998) présentent différentes mesures d'évaluation. Ces auteurs reprennent des mesures retrouvées dans la littérature et en élaborent de nouvelles, par exemple sous forme de coefficient de similarité. Ces mesures sont associées à la qualité des regroupements. Cet angle d'analyse peut être adapté pour l'objectif d'évaluation de la performance de l'implantation.

Dans le cas d'application de modèles de simulation, les indices proposés pour l'évaluation de la performance du système peuvent aussi être repris. Les travaux de Ram et Viswanadham (1992) et de Farrington et Nazemetz (1998) présentent deux natures d'indices associés à la simulation :

- les mesures traditionnelles, comme le temps moyen de fabrication, le niveau moyen des en-cours, la distance moyenne parcourue/commande, les taux d'utilisation des machines, les longueurs de files d'attente, le débit de production et les temps d'attente
- les mesures non traditionnelles, comme le nombre moyen d'interactions interdépartementales/commande, le nombre moyen de commandes actives/département, l'intervalle interarrivée de produits d'une même famille

Règle générale, ces indicateurs offrent peu de renseignements sur la qualité de l'implantation en fonction des besoins de production. Par exemple, une entreprise peut avoir un haut taux de commandes actives, dû à la complexité des gammes de production, et une implantation satisfaisante.

Contrairement à des indicateurs de performance **de production**, comme les mesures énumérées ci-haut, les indicateurs élaborés sont dédiés à l'évaluation de la performance **de l'implantation**. En effet, Tompkins et al. (1996) mentionnent que des variations dans les mesures de production n'entraînent pas nécessairement une révision de l'implantation. Des ajustements associés à l'affectation des équipements, à la maintenance des équipements, à la coordination entre les fournisseurs, la production et la clientèle, et autres ajustements peuvent être instaurés dans un but d'amélioration de la production.

Lin et Sharp (1999a et 1999b) ont déterminé 7 classes de critères d'évaluation **d'alternatives d'aménagement**, regroupées sous trois thèmes : le coût, le flux et l'environnement. Ces critères sont repris et adaptés, lorsqu'applicable, au problème d'évaluation périodique d'une implantation. D'autres causes possibles, énumérées dans la littérature, déterminant la nécessité d'une révision de l'implantation, sont prises en compte lors de l'établissement de critères pour **l'évaluation périodique de l'implantation**. L'annexe 2 présente, par auteurs, une revue de littérature pour l'évaluation d'alternatives d'implantation. Entre autre, cette annexe inclut les catégories de changements proposées par Tompkins et al. (1996), les mesures d'évaluation pour la sélection d'une implantation de Galbraith et Miller (1990), celles décrites par Konz (1985) et les ratios de productivité du Material Handling Institute décrits par Sule (1994). Les critères de Muther (1973) pour l'évaluation de l'implantation (annexe 1) peuvent aussi être considérés du point de vue de causes possibles menant à la révision de l'implantation.

Dans une optique d'évaluation périodique d'une implantation, les critères décrits dans la littérature sont regroupés sous quatre thèmes. Ces thèmes sont ceux proposés au chapitre précédent : les produits, les équipements de production, le système de manutention et la gestion de production. Le tableau 4.1 présente les critères d'évaluation périodique d'une implantation discutés dans la littérature et différentes mesures pour chaque thème.

Tableau 4.1 Critères d'évaluation périodique d'une implantation, par thèmes

THÈMES	CRITÈRES	MESURES TIRÉES DE LA LITTÉRATURE
Produits	Processus opératoires, Degré de complexité, Structure de produits.	<ul style="list-style-type: none"> • en \$: ventes annuelles/inventaire(fin de période) • nombre d'en-cours/chiffre d'affaires annuel • lignes de commandes/période, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - quantité complétées/quantité totale - quantité expédiée/heures de travail • commandes /période, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - quantité en retard/quantité complétées • délais de fabrication • temps d'opérations/délai de fabrication
Équipements de production	Méthodes de production, Parc-machines, Relations interactivités, Activités de contrôle, Rejets et rebuts, Adaptabilité, Accessibilité.	<ul style="list-style-type: none"> • capacité • disponibilité (outils et matériel), par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - capacité disponible/capacité nécessaire • taux d'utilisation, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - temps-machine/temps total • bris et pannes • temps de mise en course • rejets et rebuts (quantité, origine et entreposage) • relations interactivités, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - respects des relations critiques
	Dimensionnement, Gestion de l'espace, Capacité d'expansion.	<ul style="list-style-type: none"> • bâtiment, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - encombrement de surface (colonnes, ...) • espace suffisant et leur utilisation, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - ratio d'espace occupés - ratio d'espaces disponibles - distribution des espaces inoccupés • départements, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - ratio de formes des départements - variation de dimensions - variation de dimensions – activités critiques - variation du positionnement - dimensions minimales

Tableau 4.1 Critères d'évaluation périodique d'une implantation, par thèmes (suite)

THÈMES	CRITÈRES	MESURES TIRÉES DE LA LITTÉRATURE
Équipements de production (suite)		<ul style="list-style-type: none"> ● capacité d'expansion, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - différence entre ratio d'espaces inoccupés et ratio d'augmentation d'espace des activités
Système de manutention	Méthodes, Équipements, Produits endommagés.	<ul style="list-style-type: none"> ● taux d'utilisation, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - temps de manutention - temps de (déplacements + prise + dépose) - nombre d'heures de manutention/nombre total d'heures - observations instantanées, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> ● nombre actif/nombre total ● (vitesse de déplacement * poids)/ (vitesse standard * poids standard) - déplacements à l'heure/capacité théorique ● coût de manutention/produit, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - ratio idéal/actuel ● salaires de manutention/salaire total ● par produits, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - nombre de dépl./nombre d'opérations - distance totale parcourue/nombre de dépl. ● unités de charge : quantités endommagés/total
	Allées, Orientation du flux, Mesure de distance.	<ul style="list-style-type: none"> ● allées, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - forme d'allées (en ligne droite, ...) - aire desservie par le réseau/longueur d'allées - volume d'espace: allées/total - facilité d'accès aux activités - redondances de routes - engorgement d'allées ● intersections, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - types (4-coins, 3-coins) - nombre - des flux

Tableau 4.1 Critères d'évaluation périodique d'une implantation, par thèmes (suite)

THÈMES	CRITÈRES	MESURES TIRÉES DE LA LITTÉRATURE
Système de manutention (suite)		<ul style="list-style-type: none"> • flux, par exemple : <ul style="list-style-type: none"> - somme des distances * volumes déplacés - distance des déplacements - densité des déplacements - entre activités non adjacentes/total - retours en arrière et déviations ("bypassing") - linéarité
Gestion de production	Structure organisationnelle, Philosophie de gestion, Horaire de travail, Entreposage.	<ul style="list-style-type: none"> • durées et longueurs des files d'attente • espace d'entreposage utilisé

La main-d'oeuvre n'est pas considérée dans l'établissement des critères. Comme mentionné au chapitre précédent, celle-ci peut être évaluée de façon indirecte à l'aide de critères comme le taux d'utilisation des équipements de production et de manutention, et l'horaire de travail. Les mesures de salaires de la main-d'oeuvre décrites par Konz (1985), soit : le ratio de la manutention directe sur la main-d'oeuvre totale et le ratio de la manutention par les employés de production sur la main-d'oeuvre totale, ne sont donc pas incluses dans notre analyse. Pour la même raison, le niveau d'inventaire et l'énergie consommée, respectivement décrits par Konz (1985), et par Konz (1985) et Sule (1994), ne sont pas considérées pour l'élaboration des critères.

Dans les pages suivantes, une discussion sur les critères et mesures retrouvés dans la littérature et présentés au tableau 4.1 est faite. Aussi, les différents indicateurs de performance élaborés dans ce chapitre sont introduits.

Produits

Pour le premier thème - **Produits** - du tableau 4.1, il est difficile d'établir une relation entre les résultats des deux mesures associées aux ventes annuelles et la performance de l'implantation.

Par exemple, une hausse de ce ratio peut être associée à un nouveau produit d'importante valeur de revente. Aussi, comme cité par Neely et al. (1995), il est préférable d'exclure les mesures financières de l'analyse de performance. Les mesures relatives aux préparations de commandes font directement référence à l'évaluation de performance des activités de collecte de commandes et d'expédition, et non à la performance de l'implantation. Finalement, l'évaluation des temps de production peut être faite à l'aide d'autres critères, par exemple associés à l'utilisation des équipements, des espaces d'entreposage ou des politiques de gestion de la production.

Nous considérons que ce thème implique deux critères importants à surveiller : les quantités et les processus opératoires. Les quantités fabriquées sont directement reliées à la sélection du type d'implantation préconisé. Par exemple, l'implantation associée à un produit qui est au début de son cycle de vie (faible demande) est peut-être différente de l'implantation pour l'étape de maturité (importante demande). Considérant des regroupements en famille de produits, un premier indicateur peut être élaboré. Le ratio de quantité à fabriquer est établi pour l'évaluation des variations associées aux quantités fabriquées. Ce ratio permet un suivi de deux types : 1) la quantité d'un produit par rapport à sa famille, et 2) la quantité d'une famille par rapport à la production globale. Aussi, les changements relatifs à la structure de produits peuvent être détectés par ce ratio.

Pour leur part, les processus opératoires impliquent l'utilisation de l'un ou l'autre des équipements de production. La performance de l'implantation est directement influencée par la sélection des processus opératoires. Par exemple, une modification dans un processus opératoire peut avoir un effet non négligeable sur la densité de circulation sur certains segments d'allées. Elle peut aussi impliquer une sur- ou sous-utilisation d'un équipement de production. La localisation de cet équipement peut donc être remise en cause. Un deuxième indicateur, relatif au ratio de procédé de fabrication, est donc développé.

Équipements de production

Un troisième indicateur, associé au taux de fonctionnement des équipements de production, peut être élaboré. Ce ratio combine différentes informations associées aux mesures de capacité, de

disponibilité, de temps de mise en course, et de bris et pannes retrouvées dans la littérature. Considérant qu'une entreprise possède souvent plus d'une machine d'un même type, il est intéressant d'évaluer ce ratio selon deux angles différents : 1) le taux de fonctionnement d'une machine particulière, et 2) le taux de fonctionnement d'un type particulier de machine. Aussi, des variations du critère de rejets et rebuts peuvent être détectées à l'aide du taux de fonctionnement des équipements de production, de la manutention et de l'entreposage. Le suivi des rejets et rebuts fait partie de la fonction du contrôle de qualité, élément essentiel à tout système manufacturier. Aucun critère spécifique aux rejets et rebuts n'est donc développé.

L'indicateur du taux de fonctionnement peut aussi être utilisé pour les activités de contrôle, si l'objectif poursuivi nécessite le suivi de celles-ci. L'évaluation des relations interactivités peut être faite à l'aide d'indicateurs qui sont fonction de la distance parcourue ou des retours en arrière. L'encombrement de surface est une mesure reliée à la conception du bâtiment, donc non pertinente pour l'évaluation de la performance de l'implantation.

Lin et Sharp (1999a) ont élaboré des mesures associées à la notion de capacité d'expansion de l'entreprise. En effet, il ne suffit pas d'avoir une certaine quantité d'espaces disponibles, il faut que celles-ci soient de dimensions utilisables à des fins de production. Ces mesures d'espaces disponibles et de distribution des espaces peuvent être associées à notre quatrième indicateur qui évalue le ratio de dispersion des équipements de même type. Un groupe principal de production, associé à l'implantation physique, est défini pour chaque type d'équipement de production. Une machine ne faisant pas partie de ce groupe est dite un îlot de production. Ce ratio permet de déterminer la concentration des machines d'un même type dans le groupe principal en terme de dimensions (2D ou 3D) par rapport aux dimensions totales utilisées par ce type d'équipement. Selon le type d'implantation préconisé, les limites acceptables de dispersion des équipements de production sont différentes.

L'évaluation d'activités critiques, que ce soit en terme de dimensionnement de départements, de flux interactivités ou autres, ne nécessitent pas d'établissement de ratios particuliers. La définition d'une activité critique est synonyme d'un élément-type de production,

notion définie au chapitre précédent. Le suivi d'une activité critique passe donc par sa sélection en terme d'élément-type et par la sélection d'indicateurs de performance appropriés.

Système de manutention

Comme mentionné précédemment, les mesures financières comme les coûts de manutention et les salaires, ne sont pas incluses dans l'élaboration d'indicateurs de performance. Les mesures de Jabot (1977) utilisant un paramètre associé au nombre de déplacements font référence à des changements dans le processus opératoire. Ce critère est évalué à l'aide de l'indicateur 2, le ratio de procédé de fabrication. Aussi, comme pour le suivi des rejets et rebuts générés par les opérations de production, le suivi des unités endommagées lors de la manutention fait partie des fonctions du contrôle de qualité. Les ajustements pour réduire ou minimiser ces résultats négatifs peuvent, à la limite, consister en un changement d'itinéraire, ce qui affecte la performance de l'implantation.

Jabot (1977) propose différentes mesures pour l'évaluation de la manutention. Ces mesures, comme le ratio du nombre total d'heures de manutention sur le nombre total d'heures de fabrication et le ratio du nombre total d'opérations de manutention sur le nombre total d'opérations de production, ne considèrent pas tous les aspects de la manutention. Il est donc nécessaire de compléter ces ratios et d'en élaborer de nouveaux qui tiennent compte de notions comme les retours en arrière et l'utilisation des allées de circulation.

Un cinquième indicateur élaboré est fonction de la distance parcourue. Comme pour l'indicateur associé à la quantité à fabriquer, cet indicateur permet un suivi de deux types : 1) la distance parcourue d'un produit par rapport à sa famille, et 2) la distance parcourue d'une famille par rapport à la production globale. Des variations associées à des changements dans le processus opératoire, dans le parc-machines (l'ajout, le retrait, le déplacement ou autre d'une machine), ou même dans la gestion de la manutention peuvent être détectées par cet indicateur. Aussi, en combinaison avec l'indicateur de quantité, les résultats obtenus offrent plus de détails sur la performance de l'implantation que la mesure traditionnelle, soit la multiplication de la quantité par la distance pour un produit particulier.

Farrington et Nazemetz (1998) mentionnent qu'il est nécessaire d'évaluer l'impact des retours en arrière sur la performance du système manufacturier. Cependant, ils n'établissent aucune équation permettant le suivi de ce critère. Un sixième indicateur de performance est donc défini, soit le ratio de retours en arrière. Contrairement au ratio de distance, il est nécessaire de déterminer l'orientation générale de la circulation sur les allées, soit uni- ou soit bidirectionnelle. Aussi, ce ratio est fonction des unités de charge définies pour la manutention des produits et non fonction de la quantité fabriquée.

Comme pour les équipements de production, un indicateur de performance associé au taux d'utilisation des équipements de manutention est développé. Ce septième indicateur, le ratio de manutention, peut être évalué par une série de mesures continues ou à l'aide de la technique d'observations instantanées. La seconde méthode est préconisée puisque les informations d'utilisation des équipements sont rarement disponibles en entreprises. Lin et Sharp (1999a) considèrent les temps de manutention et de prise et dépose des unités de charge. À ces temps, il est nécessaire d'ajouter le temps de manutention à vide. Aussi, ils proposent un ratio de capacité disponible sur la capacité nécessaire. Cette mesure n'est pas considérée puisqu'elle est contraire aux standards utilisés pour lesquels une valeur inférieure à 1 indique une sous-utilisation de l'équipement, ce qui, dans leur cas, indique un manque à gagner en terme de capacité. L'indicateur proposé est donc une mesure de la demande en fonction de la capacité opérationnelle d'un type d'équipement de manutention.

Les critères associés aux caractéristiques physiques des allées (formes, dimensions) et des intersections (nombre, types) font implicitement référence à la conception ou à une révision de l'implantation. Des changements apportés à l'aménagement physique de l'implantation impliquent une nouvelle période du cycle de vie de l'implantation. Aussi, le critère de redondance des routes est associé à la sélection du type d'implantation et de la forme de réseau de couloirs. Ce critère n'est donc pas considéré pour l'évaluation des performances de l'implantation.

D'autres critères, associés à l'utilisation des allées de circulation, peuvent être regroupés sous une mesure. Un huitième indicateur, le ratio d'engorgement, inclut une évaluation de la densité de circulation sur les segments d'allée. Cet indicateur de performance considère les paramètres de

distance et de volume, établis en terme d'unités de charge. Selon le principe utilisé pour notre méthodologie d'analyse, soit l'élaboration de ratios des données actuelles par rapport au référentiel, les valeurs des densités référentielles des segments d'allée de circulation doivent être évaluées.

Entre autre, la densité référentielle pour un segment particulier d'allée est fonction de :

- des dimensions du segment,
- du type de segment, uni- ou bidirectionnel,
- des équipements de manutention utilisés sur le segment : nombre et variétés, dimensions et autres caractéristiques,
- des caractéristiques des produits manutentionnés sur le segment.

Finalement, le critère de la linéarité du flux de circulation est un paramètre considéré lors de l'affectation d'un produit à des machines particulières. Aussi, la sélection du type d'implantation et de la forme de réseau de couloirs a un impact direct sur ce critère. Les indicateurs de distance parcourue, de retours en arrière et de densité de circulation sur les segments d'allées permettent de faire un suivi indirect de ce critère.

Gestion de production

Deux notions associées à la gestion de production peuvent être mises en équation pour l'évaluation de la performance de l'implantation, soit l'entreposage et l'horaire de travail. Un neuvième indicateur relatif à l'entreposage des en-cours permet de faire le suivi des espaces utilisés.

Un nouvel angle d'étude est la considération des espaces dits non officiels. Ces espaces peuvent être une semi-remorque, un bout d'allée, un espace vide entre deux équipements de production ou tout autre espace où aucun contrôle n'est effectué. Cet indicateur de performance permet donc de faire un suivi de l'utilisation des espaces, de la quantité des en-cours, et indirectement de la longueur des files d'attente.

Un dixième indicateur est associé à l'horaire de travail. Cet indicateur permet de faire un suivi sur le temps de production utilisé et d'indiquer les tendances de production. Il peut être établi sous deux formes différentes : un ratio pour une catégorie particulière d'employés et un autre pour la production globale. Le suivi de la sous-traitance est un domaine d'application de cet indicateur.

Tous les horaires de travail, que ce soit en temps régulier, en temps partiel, en temps supplémentaire ou en temps de sous-traitance, doivent être considérés, et ce pour la transformation de produits.

4.3 Contexte d'application

Les indicateurs élaborés font référence à une évaluation d'une implantation détaillée dans le secteur manufacturier. Par contre, il est possible de les modifier pour l'évaluation d'une implantation générale ou pour l'évaluation relative à une fonction particulière d'une entreprise, ou à un autre secteur économique. Les équations sont présentées sous forme de ratio. La précision des résultats, associée au nombre de chiffres significatifs et nécessaires pour l'évaluation de chacun des indicateurs, est fonction de données du système étudié, des indicateurs sélectionnés et de leur valeur référentielle. L'évaluation des indicateurs a pour but la détection des changements majeurs de la performance de l'implantation par rapport aux besoins de la production. Cette évaluation se fait de façon périodique, à intervalles soit réguliers, soit définis de façon aléatoire. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de carte de contrôle. Les domaines de solution associés aux indicateurs et présentés dans les pages suivantes comportent un ou deux axes, selon l'indicateur étudié. Pour une évaluation périodique d'un indicateur, un axe temporel doit nécessairement être ajouté. Dans un but de clarté de présentation graphique des domaines de solution des indicateurs, cet axe est omis dans les pages qui suivent.

La terminologie utilisée pour l'analyse des résultats d'une évaluation périodique est : le **statu quo** de l'implantation, la **pertinence** des éléments-types et l'**analyse**. Une valeur calculée d'un indicateur respectant les bornes prédéfinies signifie un **statu quo** par rapport au référentiel, c'est-à-dire qu'aucune modification n'est à apporter à l'implantation pour la période étudiée. Une déviation de cette valeur au-delà de bornes prédéfinies implique une **analyse** des causes de cette variation, celle-ci pouvant avoir pour conséquence une révision partielle ou complète de l'implantation. L'analyse doit être effectuée à deux niveaux : la révision de l'implantation et la remise en question de la sélection des éléments-types. La **pertinence des éléments-types**, terme retrouvé dans l'analyse des résultats de certains indicateurs, est associée à une variation hors borne de l'indicateur. Cette variation remet en question la représentativité de l'élément-type sélectionné

en fonction de la production actuelle. Il est donc nécessaire d'analyser les éléments-types identifiés pour représenter le système de production étudié.

Il est toujours possible d'évaluer s'il existe une tendance à la hausse ou à la baisse de la valeur pour un indicateur particulier. Si tel est le cas, une analyse plus approfondie permet de conclure s'il est toujours valable d'inclure dans l'analyse cet élément-type particulier et si l'implantation sera influencée par les variations de cet indicateur.

4.4 Les produits

Ce sous-ensemble d'éléments-types inclut les produits et les familles de produits, selon le type de production analysé. Comme mentionné précédemment, deux indicateurs sont développés pour ce thème : un ratio de quantité à fabriquer et un ratio de procédé de fabrication. Les pages suivantes décrivent les indicateurs élaborés.

4.4.1 Indicateur #1 - Ratio de quantité à fabriquer

La variable incluse dans ce ratio est le nombre d'unités à produire. Lors de l'étape de conception d'une implantation, la majorité des modèles et des méthodes utilise cette variable pour le positionnement relatif des activités. Par extension à cette application, il est considéré nécessaire de faire un suivi périodique du nombre d'unités à produire dans un but d'identification de fluctuations. En effet, ces fluctuations, au-delà de certaines limites, peuvent engendrer des effets néfastes sur l'implantation.

Cet indicateur de performance de l'implantation permet de détecter les variations majeures de la demande d'un produit par rapport à la quantité totale de sa famille ou, de façon plus générale, d'une famille de produits par rapport à la production globale. De façon plus spécifique, la production totale est calculée comme étant le nombre de produits sur lesquels une première opération, ci-dessous appelée opération #10, est effectuée. Cette valeur est biaisée puisque la quantité finale de production est toujours inférieure ou équivalente à cette valeur étant donné les rejets ou rebuts générés à chacune des étapes de transformation du produit. Pour éliminer l'effet

négatif du biais, le ratio de quantité à fabriquer est toujours calculé en fonction de la première opération effectuée sur le produit. Les équations (4.1a) et (4.1b) sont respectivement associées au ratio de quantité à fabriquer d'un produit α par rapport à sa famille β et d'une famille de produits β par rapport à la production globale.

$$INDI(\alpha) = \frac{Q(\alpha, \beta, 10, m) / \sum_{p \in \beta} Q(p, \beta, 10, m)}{Q^*(\alpha, \beta, 10, m) / \sum_{p \in \beta} Q^*(p, \beta, 10, m)} - 1 \quad (4.1a)$$

$$INDI(\beta) = \frac{\sum_{p \in \beta} Q(p, \beta, 10, m) / \sum_f \sum_{p \in f} Q(p, f, 10, m)}{\sum_{p \in \beta} Q^*(p, \beta, 10, m) / \sum_f \sum_{p \in f} Q^*(p, f, 10, m)} - 1 \quad (4.1b)$$

où $Q(p, f, o, m)$: Quantité du produit p de la famille f à transformer à l'opération o sur la machine m

α : Un produit particulier, constante de l'équation

β : Une famille de produits particulière, constante de l'équation

$*$: Variable associée à l'implantation référentielle

La description qui suit est associée à l'équation (4.1a) du ratio d'un produit α par rapport à sa famille β . Pour la seconde équation, soit (4.1b), le même développement est applicable. Mentionnons que selon les besoins d'analyse, l'une ou l'autre ou les deux équations peuvent être utilisées lors de l'évaluation périodique de la performance de l'implantation.

L'analyse de ce ratio permet de déterminer si le produit α , sélectionné comme étant un élément-type, est toujours représentatif de la famille β étudiée. Le coefficient de similarité, une caractéristique propre à chaque famille, est un autre élément influençant de façon directe les bornes inférieure et supérieure de cet indicateur. Le coefficient de similarité est une variable représentant la similitude des produits faisant partie d'une famille. Une valeur tendant vers 1 décrit une famille avec des produits très semblables, et une valeur tendant vers 0, des produits très différents. Règle générale, ce coefficient est associé au degré de similitude des processus opératoires d'une famille de

produits. Pour une famille ayant un coefficient de similarité élevé, la variation à la baisse de la quantité à fabriquer d'un produit est compensée par une hausse relative de la demande d'un autre produit de cette famille, celui-ci ayant un processus de fabrication similaire au produit considéré comme élément-type. Ainsi, le degré de variation permis de la quantité à fabriquer à l'intérieur d'une même famille est proportionnel à la similitude des procédés de fabrication des différents produits. Les bornes peuvent donc être déterminées en fonction d'intervalles de valeurs du coefficient de similarité de la famille de produits. Les valeurs faibles du coefficient de similarité n'ont pas à être considérées puisqu'implicitement un ensemble de produits ayant des différences majeures dans leurs procédés de fabrication ne devraient pas appartenir à une même famille.

L'exemple présenté au tableau 4.2 permet d'expliquer clairement les conséquences d'une variation de la demande des produits d'une famille ayant un coefficient de similarité élevé. Soit les produits A, B et C d'une même famille, A étant le produit sélectionné pour l'évaluation du ratio de quantité à fabriquer.

Tableau 4.2 Données et résultats pour l'exemple de l'indicateur #1

PRODUIT	PROCESSUS DE FABRICATION	DEMANDE (UNITÉS)		
		1994	1995	1996
A	M1 – M2 – M3 – M4 – M5	1500	2200	130
B	M2 – M3 – M4	2000	1600	170
C	M1 – M2 – M3 – M5	1200	900	100
TOTAL DE LA DEMANDE		4700	4700	400
IND1(A) =		<i>référentiel</i>	+0,467	+0,018

Pour la demande de 1995, même si la variation de la demande est importante par rapport à celle de 1994, il est possible que la révision de l'implantation ne soit pas nécessaire à ce stade puisque le coefficient de similarité de cette famille de produits est élevé. Pour la demande de 1996, la variation de l'indicateur du ratio de quantité à fabriquer du produit A est négligeable. Cependant, la pertinence du choix de cette famille comme élément-type peut être révisée. Si le ratio de quantité à fabriquer de cette famille en fonction de la production globale varie, il est peut-être nécessaire

d'analyser plus en profondeur les changements de production. Ainsi, il est essentiel, lors de l'analyse de la demande, que le ratio de quantité à fabriquer d'un produit α soit associé au ratio de quantité à fabriquer de sa famille β . L'intervalle de valeurs de cet indicateur, soit $[-1; +\infty[$, et les combinaisons possibles pour la variation des deux ratios en fonction des bornes prédéterminées sont définies à la figure 4.1.

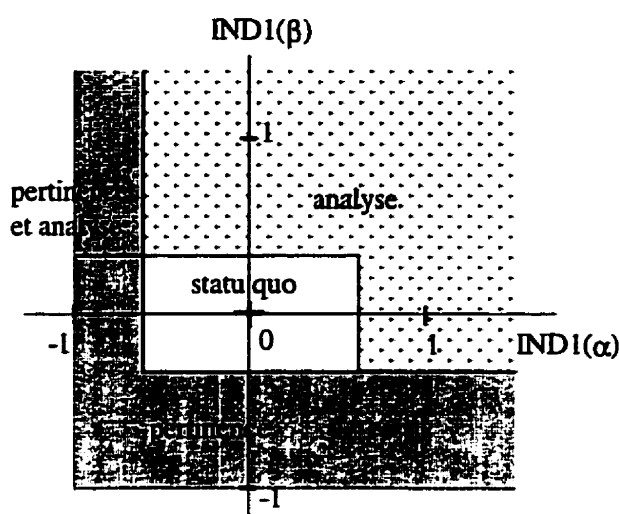


Figure 4.1 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #1

Trois termes se retrouvent à la figure 4.1 : le statu quo de l'implantation, la pertinence des éléments-types, et l'analyse. Lors d'une évaluation périodique du ratio de quantité à fabriquer, la notion de **statu quo** implique qu'il n'est pas nécessaire d'analyser de façon plus détaillée le résultat et ses conséquences sur le rendement de l'implantation.

Pour sa part, la **pertinence** est associée à la fonction représentative d'un élément-type par rapport à la production globale. Ainsi, une remise en question de l'usage d'un produit (ou famille) particulier est faite lorsque la valeur de l'indicateur est en-deçà de sa borne inférieure. En effet, pour tout système de production normal, c'est-à-dire sans variation majeure de la capacité de production, une diminution du ratio de quantité à fabriquer d'un produit (ou d'une famille) est équilibrée par une augmentation du ratio d'un autre produit (ou d'une autre famille). Le cas le plus

courant est celui relié au cycle de vie d'un produit, soit à l'étape de déclin de la demande. Ainsi, il existe sûrement un autre produit, associé à la même famille, qui voit sa quantité relative à fabriquer augmenter. Ce produit peut remplacer le produit en déclin dans la liste des éléments-types. Pour le cas particulier où la valeur de l'indicateur d'une famille est négative, la notion de pertinence doit être évaluée, même si le produit vedette de cette famille voit son ratio de quantité à fabriquer augmenter. Il n'est pas nécessaire d'analyser cette augmentation et les effets sur l'implantation puisque la production de la famille associée est en déclin.

Finalement, une **analyse** du système de production peut effectivement mener à la révision de l'implantation. Par exemple, pour une production par procédés, si la dominance du produit α augmente par rapport à un ratio constant de sa famille β , il y a lieu de se demander si le type d'implantation prôné initialement est toujours adéquat dans le contexte de production actuel. En effet, l'option de dédier un ensemble d'équipements de production pour la fabrication du produit devrait être évaluée si le niveau de la demande le justifie. L'ajout/retrait ou la variation de quantité à fabriquer d'un des produits inclus dans la famille influence aussi la valeur de cet indicateur. Il y a donc lieu de comprendre la cause de cette variation au-delà des bornes avant d'entreprendre toute action de modification de l'implantation. Cette analyse est aussi valable pour tous les cas où le ratio de quantité à fabriquer d'une famille de produits est supérieur à la borne maximale.

4.4.2 Indicateur #2 - Ratio de procédé de fabrication

Cet indicateur de performance représente les changements effectués par rapport au procédé de fabrication, c'est-à-dire l'utilisation d'un nouvel équipement de production dans la séquence de fabrication, soit à titre de remplacement d'un équipement déjà dans la séquence, soit à titre d'ajout d'une opération, par exemple un contrôle de qualité, pour la fabrication d'un produit particulier.

Cet indicateur peut sembler trivial. En effet, il est entendu qu'un changement majeur dans le procédé de fabrication d'un produit a pour conséquence immédiate une analyse du système de manutention et autres coûts relatifs à la production. Un tel changement peut être relatif à une modification de la technologie utilisée pour la fabrication d'un produit, à l'emploi d'un équipement de production plus spécialisé ou inversement, plus général, ou un changement relatif à d'autres

causes. En contrepartie, la flexibilité de la majorité des types de production est associée aux diverses possibilités de fabrication d'un produit. Toute entreprise possède plus d'un cheminement réalisable pour la fabrication d'un produit. Cette flexibilité est nécessaire étant donné l'état dynamique de l'environnement manufacturier comportant une probabilité associée aux bris et pannes de machines, à l'engorgement de certains éléments de production dû à une structure de produits variable, et autres. De ce fait, l'ajout d'un nouveau produit peut influencer la sélection de la gamme de fabrication d'un autre produit. Il est possible qu'aucune modification ne soit apportée à l'implantation, donc que les distances intermachines restent inchangées, et que seuls les cheminements de certains produits soient modifiés. Ceci entraîne une variation sur le coût total de fabrication desdits produits. Il est donc important de faire un suivi périodique de cet élément lors de l'évaluation de la performance du système de production.

L'utilisation de cet indicateur de performance sous-entend qu'un équipement de production peut être utilisé plus d'une fois lors de la fabrication d'un produit particulier. Aussi, la séquence de fabrication d'un produit est prise en compte puisqu'elle a une influence directe sur les paramètres de circulation, soit par rapport au flux et à l'orientation des mouvements de pièces. Ce ratio n'est applicable qu'à un produit particulier, celui-ci faisant partie de l'ensemble des éléments-types du système de production. L'équation suivante présente le ratio de procédé de fabrication élaboré qui a pour but la comparaison de la séquence des opérations du référentiel, en fonction de celle actuellement utilisée.

$$IND2(\alpha) = \sum_o \sum_m \left| \text{procédé}(\alpha, \beta, o, m) - \text{procédé}^*(\alpha, \beta, o, m) \right| \quad (4.2)$$

où $\text{procédé}(p, f, o, m) = 1$ Si, pour le produit p de la famille f , l'opération o est
performée sur la machine m

$= 0$ Sinon

α : Un produit particulier, constante de l'équation

β : Une famille de produits particulière, constante de l'équation

$*$: Variable associée à l'implantation référentielle

Par définition, l'intervalle de valeurs possibles est $[0; +\infty[$, et plus précisément, les états de cet indicateur sont de deux natures : i) indicateur de valeur nulle et ii) indicateur de valeur entière positive. La figure 4.2 résume les résultats possibles et les actions à entreprendre pour l'évaluation du ratio de procédé de fabrication pour un produit α de la famille β .

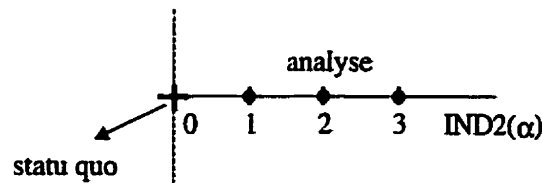


Figure 4.2 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #2

La variation de cet indicateur peut être de différentes origines : ajout ou retrait d'une opération, remplacement d'un équipement de production exécutant une seule opération, remplacement d'une opération par une autre, regroupement de plusieurs opérations sous une seule phase de transformation, changement dans la séquence des opérations. L'objectif d'utilisation de ce ratio est la détection de toute variation de la gamme initiale de fabrication d'un élément-type. Ainsi, un **statu quo** de l'implantation est décrété lorsque l'indicateur est nul et une **analyse** doit être initiée pour toutes autres situations. En effet, même une seule modification du processus opératoire peut avoir d'importantes répercussions sur la circulation, et par conséquent, sur le choix de l'implantation. L'analyse fait référence au choix de la séquence des opérations parmi les différentes variantes possibles, à l'amélioration de l'implantation, à la sélection des éléments-types, à la révision des indicateurs affectés par ces résultats, et autres.

4.5 Les équipements de production

L'évaluation de la performance de l'implantation en fonction des équipements de production comporte deux indicateurs. Ceux-ci sont associés au taux de fonctionnement d'un équipement de production et au degré de dispersion des équipements de production. Les sections

suivantes définissent les équations et les domaines d'analyse des indicateurs de performance d'implantation proposés.

4.5.1 Indicateur #3 - Taux de fonctionnement

Le ratio du temps de fabrication en fonction de la disponibilité, excluant les temps hors service, d'un équipement de production ou d'un type de machine est représenté par cet indicateur. Deux aspects de la production influençant l'implantation peuvent être évalués à l'aide de ce ratio. Le premier aspect est relatif au temps machine des équipements du système manufacturier disponible à la production. Cet indicateur permet d'identifier les éléments définis comme étant les goulots d'étranglement de la production. Le second aspect est associé au cheminement des produits. Basé sur les résultats obtenus, il est possible d'analyser la sélection de procédés de fabrication viables dans le but d'uniformiser la production par rapport à l'ensemble des équipements disponibles. Règle générale, dans un environnement de production de type par procédés, l'utilisation uniforme de toutes les machines d'un même type a pour effet de minimiser les goulots ou la sur-utilisation d'un des équipements de ce type.

Les changements associés à une machine pouvant modifier la relation entre l'implantation et la production, et détectés par cet indicateur, peuvent être associés à une activité de production, de mise en route, d'entretien, de bris ou de pannes, ou associés au flux de production, ou autres. Il est donc essentiel d'évaluer le temps total où un équipement est considéré disponible, et ce de façon précise. Les différentes définitions qui suivent concordent avec celles du Bureau International du Travail (1985). La définition de "disponibilité" correspond à celle de Lecoufle (1994) lorsqu'il parle de "disponibilité opérationnelle".

Le temps total d'activités implique les temps d'emploi de l'équipement de production pour l'exécution d'opérations ainsi que les temps d'activités non productives. Cette dernière catégorie est associée au temps machine accessoire (changements de travail, réglages, etc.) et au temps machine hors service (temps de pannes, d'entretien, de bris, etc.). Le temps machine accessoire est défini non pas en fonction d'un lot de produits mais bien en fonction d'une unité de produit. Le temps de fonctionnement d'un équipement de production est fonction du temps total des activités excluant

tous les temps non productifs intrinsèques à l'utilisation de cette machine. Le temps machine hors service est souvent défini en tant que pourcentage du temps de fonctionnement. Le temps de fonctionnement d'un équipement particulier est donc, règle générale, inférieur au temps machine disponible. La figure 4.3 représente schématiquement les définitions associées aux temps machines et tirées d'une publication du Bureau International du Travail (1985).

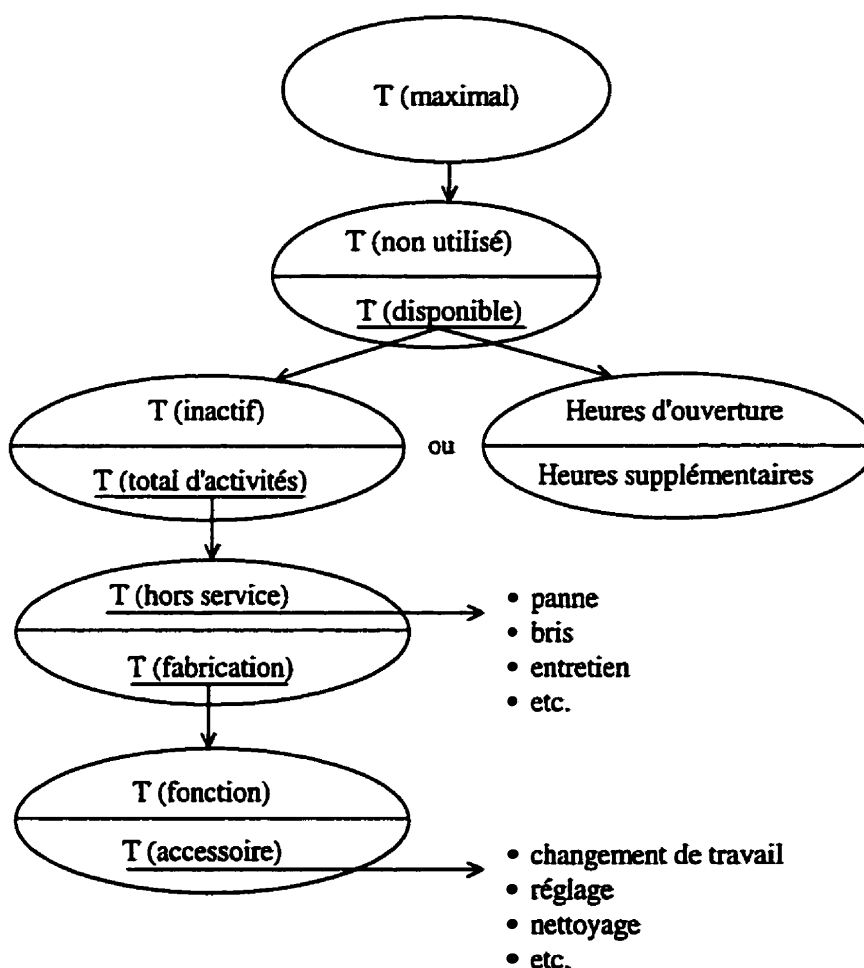


Figure 4.3 Schéma représentant les composants du temps machine maximal

Deux cas particuliers sont présents en entreprises : une seule machine pour chaque type d'équipement de production, et plus d'une machine de chaque type. Dans un environnement où

l'implantation est de type par procédés, il est courant de retrouver plus d'une machine d'un même type, par exemple des fraiseuses permettant l'exécution d'opérations de même catégorie. Ainsi, le cheminement d'un produit est fait par type d'équipement de production et la sélection finale de l'utilisation de l'une ou l'autre des machines d'un même type est fonction de la disponibilité de chaque machine. Pour ce cas particulier, le taux de fonctionnement est calculé de façon globale, c'est-à-dire par types de machine. Les équations (4.3a) et (4.3b) présentent l'indicateur de performance de l'implantation relatif au taux de fonctionnement d'un type de machine pour chacun des cas, soit respectivement pour une seule machine χ et pour plus d'une machines m pour un type EP d'équipement de production. Le taux de fonctionnement calculé est un différentiel entre le ratio des temps associés à la fabrication (temps de fonctionnement et temps accessoire) pour l'état actuel du système et le ratio pour le référentiel. Pour la première partie de l'équation, le numérateur représente le temps total associé à la fabrication de pièces. Considérant que le temps hors service est souvent évalué en tant que pourcentage du temps total de fonctionnement de l'équipement, le dénominateur représente le temps maximal disponible à la fabrication. Celui-ci est inférieur ou égal au temps inactif additionné au temps de fabrication. L'égalité est établie lorsque toutes les activités relatives au temps accessoire sont de valeur nulle, c'est-à-dire lorsqu'elles sont exécutées de façon externe à la production.

$$IND3(\chi) = \frac{\sum_f \sum_p \sum_o Q(p, f, o, \chi) * T_{\text{fabrication}}(p, f, o, \chi)}{T_{\text{disp}}(\chi) - [\%Ths(\chi) * T_{\text{fonction_total}}(\chi)]} - T^*(\chi) \quad (4.3a)$$

$$IND3(EP) = \frac{\sum_{m \in EP} \sum_f \sum_p \sum_o Q(p, f, o, m) * T_{\text{fabrication}}(p, f, o, m)}{\sum_{m \in EP} \{T_{\text{disp}}(m) - [\%Ths(m) * T_{\text{fonction_total}}(m)]\}} - \sum_{m \in EP} T^*(m) \quad (4.3b)$$

où $\%Ths(m)$: Pourcentage théorique du temps hors service pour l'équipement m

$Q(p, f, o, m)$: Quantité du produit p de la famille f à transformer à l'opération o sur la machine m

$T^*(m)$: Proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement m en fonction du temps disponible, pour le référentiel

$T_{\text{disp}}(m)$: Temps disponible pour l'équipement m

$T_{\text{fabrication}}(p,f,o,m)$: Somme des temps de fonctionnement et accessoire associés au produit p de la famille f pour l'opération o sur la machine m

$T_{\text{fonction}}(p,f,o,m)$: Temps de fonctionnement associé au produit p de la famille f pour l'opération o sur la machine m

$T_{\text{fonction_total}}(\chi)$ = Somme des temps de fonctionnement pour toutes les unités de produits utilisant l'équipement m

$$= \sum_f \sum_p \sum_o Q(p, f, o, \chi) * T_{\text{fonction}}(p, f, o, \chi)$$

χ : Une machine particulière, constante de l'équation

Dans le cas où les valeurs des paramètres ne sont pas disponibles à l'analyse, il est possible d'appliquer les notions d'échantillonnage, et plus particulièrement d'observations instantanées. L'utilisation d'un trajet prédéfini lors de la collecte de données implique un même nombre d'observations instantanées pour chaque machine d'un même type. Remarquons que, règle générale, les informations d'utilisation des équipements de production sont disponibles, par exemple avec l'emploi de feuilles de route. L'équation (4.3c) présente l'indicateur de performance relatif au taux de fonctionnement d'un type EP d'équipement de production. Les détails d'application de la notion d'observations instantanées sont présentés à l'indicateur #7, le ratio de manutention.

$$\text{IND3(EP)} = \left\{ \frac{\sum_{\text{obs}} \sum_{m \in \text{EP}} \text{Ofabrication}(m, \text{obs})}{\# \text{obs} * \text{nbre(EP)} - \sum_{\text{obs}} \sum_{m \in \text{EP}} \text{Ohs}(m, \text{obs})} \right\} - T^*(\text{EP}) \quad (4.3c)$$

où $\# \text{obs}$: Nombre d'observations instantanées effectuées au cours d'un intervalle

nbre(EP) : Nombre d'équipements de production de type EP

$\text{Ofabrication}(m, \text{obs}) = 1$ Si l'équipement m à l'observation obs est en état de fonctionnement ou d'activité accessoire

$= 0$ Sinon

$\text{Ohs}(m, \text{obs}) = 1$ Si l'équipement m à l'observation obs est hors service

$= 0$ Sinon

$T^*(EP)$: Proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement de type EP en fonction du temps disponible, pour le référentiel

Le premier terme de l'équation identifie la proportion du temps où un équipement de production de type EP est utilisé pour la production de pièces par rapport au temps total disponible. Le second terme, $T^*(EP)$, représente la proportion du taux de fabrication du type EP d'équipements de production à titre référentiel.

Il est considéré que la valeur de cet indicateur est directement reliée au type d'équipement de production analysé. Sa borne supérieure est associée au différentiel entre le taux d'utilisation maximal (soit strictement inférieur à 100%) et celui du référentiel, c'est-à-dire la capacité résiduelle disponible. Pour sa part, la borne inférieure (associée au taux de fonctionnement minimal) est directement proportionnelle au nombre d'équipements d'un même type. Par exemple, la borne inférieure d'utilisation d'une perceuse ou de trois perceuses n'est pas la même puisque la demande est distribuée sur une ou trois machines.

Il est nécessaire de souligner l'importance du suivi de la maintenance des équipements. En effet, une augmentation du temps associé à des pannes, à des bris de l'équipement ou à de l'entretien se répercute sur le temps total disponible à la fabrication. Pour une utilisation globale d'un type d'équipement de production respectant les bornes préétablies, le taux de temps hors service peut être anormalement élevé. La capacité de réponse à une augmentation de la demande est donc touchée par cette dégradation du service. Ainsi, le taux du temps hors service doit être en tout temps évalué, par exemple via la mise en place d'un programme de maintenance préventive, ceci dans un esprit d'action proactive par rapport à l'efficacité de l'équipement de production en fonction de l'implantation actuelle.

Considérant que, dans une entreprise de transformation moderne, les informations relatives à l'utilisation des équipements de production sont facilement disponibles, un cas d'utilisation des équations (4.3a) et (4.3b) pour l'indicateur #3, le taux de fonctionnement, est élaboré.

L'analyse de cet indicateur doit permettre la détermination du moment où un équipement de production est sur- ou sous-utilisé. Il est donc nécessaire de déterminer les bornes inférieure et supérieure de variations admissibles pour cet indicateur. Par définition, les deux bornes doivent être déterminées. Un différentiel du taux d'utilisation inférieur à la borne minimale d'un équipement de production nécessite la remise en question de ce type d'équipement dans le parc de machines de l'entreprise, ou du moins une réduction du nombre de machines d'un même type. Par conséquent, une révision de l'implantation s'avère nécessaire puisque le retrait d'un équipement de production affecte directement la performance de l'implantation. De la même façon, un différentiel du taux d'utilisation au-delà de la limite supérieure nécessite une analyse des causes de cette variation et des conséquences sur l'implantation actuelle. La dégradation de l'implantation peut être telle qu'une étude de réaménagement doit être initiée.

Pour le cas d'un type d'équipement de production de plus d'une machine, les limites inférieure et supérieure varient en fonction du nombre de machines du même type. La variation des valeurs des bornes est basée sur le fait qu'une augmentation de la production est répartie uniformément entre les équipements de production d'un même type. Ainsi, plus l'entreprise possède un grand nombre de machines d'un même type, plus la variation de production a un effet négligeable sur le taux d'utilisation d'une machine particulière. Ce constat est basé sur l'hypothèse d'une utilisation uniforme des équipements de même type.

L'exemple suivant comporte une production des produits XX et YY nécessitant une opération de fraisage. Les données complémentaires présentées aux tableaux 4.3 et 4.4, et les résultats du taux de fonctionnement des fraiseuses, soit l'équation 4.3 pour l'indicateur IND3(EP), au tableau 4.5, sont associés à cet exemple.

Tableau 4.3 Paramètres de fabrication des produits pour l'indicateur #3

PARAMÈTRES DE PRODUCTION	PRODUITS	
	XX	YY
scénarios de la demande : Q (p,f,o,m)	80 et 120	80 et 120
Temps par opération de fraisage : Tfonction (p,f,o,m)	#10 = 2 min. #20 = 4 min. #30 = 2 min.	#10 = 4 min. #20 = 5 min. #30 = 3 min.
Temps accessoire par opération : Tacc (p,f,o,m)	#10 = 0,10 min. #20 = 0,10 min. #30 = 0,05 min.	#10 = 0,05 min. #20 = 0,10 min. #30 = 0,05 min.

Tableau 4.4 Paramètres de production de fraiseuses pour l'indicateur #3

PARAMÈTRES DE PRODUCTION	VALEUR
Temps disponible : Tdisp (m)	2250 min./semaine
Pourcentage théorique de temps hors service : %Ths (m)	8 %
Proportion de temps de fonctionnement du référentiel : T* (m)	0,85

Tableau 4.5 Résultats de l'exemple pour l'indicateur #3

NOMBRE DE FRAISEUSES	COMBINAISON DE QUANTITÉ DE PRODUITS XX & YY			
	XX = 80 & YY = 80	XX = 80 & YY = 120	XX = 120 & YY = 80	XX = 120 & YY = 120
1	-0,079	+0,169	+0,088	+0,342
2	-0,476	-0,360	-0,400	-0,280
3	-0,603	-0,527	-0,552	-0,476
4	-0,666	-0,610	-0,628	-0,571

Les résultats obtenus démontrent bien qu'une variation de la quantité à produire affecte cet indicateur de performance de l'implantation. Tel que mentionné précédemment, plus le nombre de machines d'un même type est élevé, moins la variation de la quantité a d'influence sur la valeur du taux de fonctionnement de ce type.

Aussi, les résultats démontrent que cet indicateur permet la détection de variations associées à la structure de produits. Pour une fraiseuse, les valeurs positives du taux de fonctionnement indiquent une sur-utilisation. Une analyse est initiée dans le but de déterminer l'état de celle-ci (ponctuelle ou permanente) et les actions à entreprendre (réduction des temps hors service, sous-traitance, heures supplémentaires, achat d'équipement, etc.). Dans tous les autres cas, ce type d'équipement est sous-utilisé puisque la valeur de cet indicateur est négative. La définition de la borne inférieure identifie la valeur minimale au-delà de laquelle la pertinence du suivi de ce type équipement doit être remise en cause.

Ce ratio du taux de fonctionnement permet de déterminer, pour un certain type de machine, les effets d'une variation de la production sur la performance globale de l'implantation. Considérant que l'ajout ou le retrait d'une machine est peu fréquent, cet indicateur permet de faire le suivi de paramètres précis reliés à cet équipement particulier tels que le flux de produits et les temps accessoires et de transformation associés.

Il peut être intéressant de considérer, en fonction de l'objectif visé lors de l'évaluation périodique du système manufacturier, l'utilisation de cet indicateur de façon comparative. Le ratio d'un type d'équipement et le ratio d'une machine incluse dans ce type particulier peuvent être évalués en parallèle. Cette analyse considère a priori que tous les équipements appartenant à un même type ont un taux de fonctionnement similaire. Une déviation notable des deux ratios peut être la conséquence d'une augmentation des temps associés aux entretiens, aux bris ou aux pannes pour une machine particulière, ou d'une politique de gestion des en-cours différente de celle établie initialement.

La figure 4.4 résume les actions à initier en fonction des résultats obtenus lors de l'évaluation de cet indicateur pour une machine particulière χ . Le graphique inclut l'intervalle de

valeurs possibles, soit par définition $[-1; +1]$ et les bornes prédéfinies strictement incluses dans cet intervalle. Le domaine de solutions pour un ensemble de machines de même type EP est de même nature.

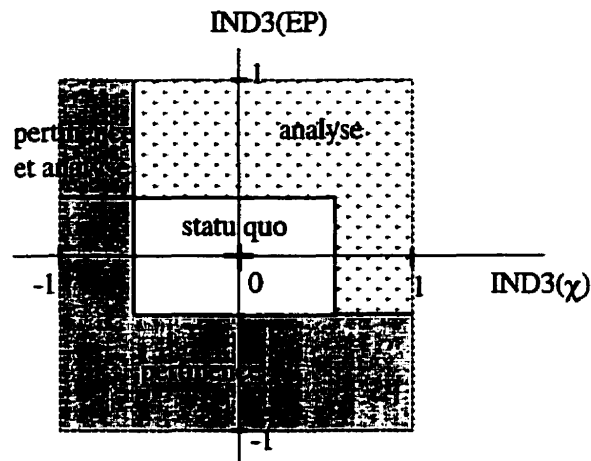


Figure 4.4 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #3

Les actions proposées réfèrent directement à l'utilisation de l'indicateur de performance #1, le ratio de quantité à fabriquer. En effet, une **analyse** ou une remise en cause de la **pertinence** de l'élément-type est initiée lorsque la valeur de l'indicateur #3 est hors borne, sinon, un **statu quo** est établi. Les causes du non respect des bornes sont de plusieurs natures telles que :

- une variation des temps de fonctionnement, accessoire ou hors service,
- une modification quant à la taille du lot de production,
- une variation de la quantité à produire,
- un changement associé au processus opératoire d'un produit,
- une variation de la capacité nominale d'un type d'équipement,
- le type de gestion de production prôné.

De même que pour les indicateurs précédents, les bornes sélectionnées des valeurs admissibles peuvent être revues. Aussi, l'existence d'une tendance à la hausse ou à la baisse de ce

ratio de performance doit être identifiée, et ce toujours dans un but d'action proactive pour l'optimisation de l'implantation en fonction des besoins du système.

4.5.2 Indicateur #4 - Ratio de dispersion des équipements

Un suivi périodique de la surface de l'atelier utilisée par un type d'activité permet de détecter des changements importants relatifs aux performances de l'implantation actuelle. L'unité de mesure de l'espace est fonction du type d'entreprise manufacturière ainsi que des objectifs visés. Règle générale, seul l'espace au sol (en deux dimensions) est considéré. Cependant, l'espace en trois dimensions peut être considéré pour des situations particulières comme des procédés de transformation utilisant la dimension verticale, par exemple un séchoir industriel tel qu'utilisé dans le domaine pharmaceutique, chimique ou autre.

Une implantation de type par procédés est définie comme étant des regroupements de plusieurs ensembles d'équipements de production de même nature. Ainsi, l'objectif global d'une implantation, au point de vue de la manutention, est de minimiser les distances entre les points de prise et de dépose pour chacun des ensembles d'équipements, et ce en fonction de la circulation des produits. L'objectif ultime de cet indicateur de performance de l'implantation est donc l'évaluation du degré de dispersion des équipements de production de même type. Par définition, ce ratio n'est pas utilisé pour le cas d'implantation par produits. Aussi, il peut être extrapolé pour d'autres types d'implantation telle que le type holographique de Marcotte et Montreuil (1995).

L'objectif étant le suivi du système en fonction du type d'implantation sélectionné, il est considéré que le ratio de dispersion basé sur la surface utilisée est préférable au coefficient d'éloignement, celui-ci étant mesuré par la distance entre les îlots de production et le groupe associé. En effet, la mesure de distance peut biaiser la conclusion quant aux causes de la variation de ce ratio. Par exemple, une augmentation significative de la distance totale reliant les îlots et le groupe peut être associée à l'ajout d'une machine très éloignée du groupe, ou à l'ajout de plusieurs machines dans un des îlots à courte distance du groupe principal.

Le ratio de dispersion proposé est basé sur l'hypothèse suivante : l'achat d'un équipement de production n'implique pas nécessairement une révision de l'implantation. En effet, plusieurs gestionnaires optent pour une solution rapide et économique à court terme, soit la localisation du nouvel équipement là où l'espace est disponible. Par contre, cette décision a fréquemment pour conséquence d'augmenter les distances totales parcourues pour certains produits ou familles de produits. Il est donc nécessaire de faire un suivi périodique de ce paramètre dans un but de révision lorsque le niveau de dégradation de l'implantation est trop important.

L'évaluation de cet indicateur de performance n'est faite que pour des éléments-types associés aux équipements de production. L'équation (4.4) est établie pour la définition du ratio de dispersion des équipements. Le coefficient de 1,15, associé à la somme des espaces des équipements localisés à l'extérieur du regroupement physique de sa famille, permet de tenir compte des espaces nécessaires pour les services et les déplacements de produits et de personnel associés à chaque équipement. L'augmentation des espaces pour un équipement de production, soit 15 %, est tiré de Tompkins et al. (1996). Considérant que l'unité de charge utilisée est la palette de dimensions standards, ils estiment l'intervalle du pourcentage de majoration entre 10 % et 20 %. Le pourcentage sélectionné peut être réévalué en fonction de l'unité de charge réelle du système manufacturier étudié ainsi qu'en fonction des méthodes de manutention utilisées, qu'elles soient au sol ou aériennes.

$$IND4(EP) = \left[\frac{\text{groupe}(EP)}{\text{groupe}(EP) + 1.15 * \sum_{m \in \text{groupe}(EP)} \text{espace}(m)} \right]^* - \frac{\text{groupe}(EP)}{\text{groupe}(EP) + 1.15 * \sum_{m \in \text{groupe}(EP)} \text{espace}(m)} \quad (4.4)$$

où $\text{groupe}(EP)$: Aire de travail de l'îlot principal de production de machines de même type EP

$\text{espace}(m)$: Aire de travail de la machine m , un îlot secondaire de production

$*$: Variable associée à l'implantation référentielle

Par définition, le ratio de dispersion appartient à l'intervalle $[-1; +1]$. Il est important de souligner que les bornes des valeurs admissibles sont fonction du type de gestion de production appliqué par l'entreprise ainsi que du type actuel de l'implantation.

La figure 4.5 inclut les données présentées dans le cadre d'un exemple d'application de l'indicateur de performance associé au ratio de dispersion des équipements. L'exemple est associé à une entreprise comportant un département avec 5 équipements de production similaires situés dans le même environnement de travail pour un total de 20 m^2 . Le deuxième niveau représente l'achat d'une autre machine (de 3 m^2 de superficie) et son installation dans le département concerné ou ailleurs, défini comme un îlot de production. Le troisième niveau est relatif à l'achat d'une deuxième machine (de $3,5 \text{ m}^2$ de superficie) de même type.

Considérant l'état initial de l'implantation comme étant le référentiel, les valeurs de l'indicateur de performance de l'implantation relatif au ratio de dispersion des équipements pour le cas i) est de 0,0, pour le cas ii) de +0,149, pour le cas iii) de +0,128 et pour le cas iv) de +0,272. Comme pour les indicateurs précédents, une valeur positive indique une augmentation par rapport au référentiel, dans ce cas-ci une hausse de l'espace utilisée pour le type d'équipement étudié. Les résultats des cas ii) et iii) indiquent que la séquence d'ajout d'équipements de production à l'intérieur d'un département particulier ou dans des îlots de production a peu d'influence sur le résultat final associé au ratio de dispersion pour des dimensions similaires.

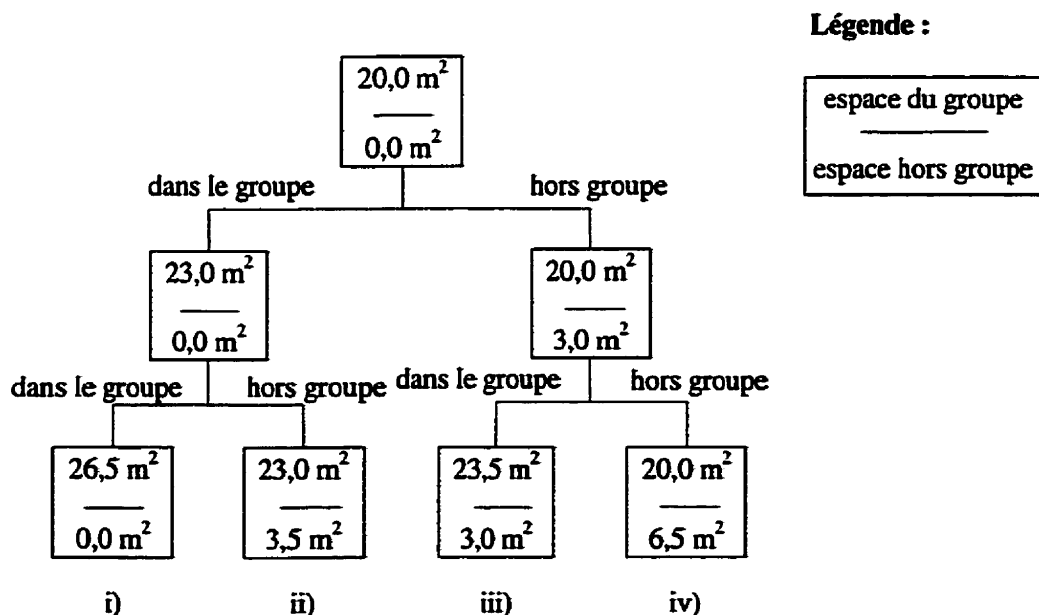


Figure 4.5 Arbre de données pour l'ajout de 1 et 2 machines pour l'indicateur #4

La variation du ratio de dispersion a des conséquences significatives par rapport à la gestion de production et au degré d'efficacité de l'implantation relatif à la production actuelle. Les équipements de production de même type étant localisés en divers points non adjacents de l'usine, la gestion de production peut être de trois natures : la sélection ponctuelle des machines pour la fabrication d'un produit, la détermination du cheminement de chaque produit en fonction des îlots, et la détermination du cheminement de chaque produit en fonction des machines. Pour le premier cas, un produit peut visiter l'une ou l'autre des machines d'un même type situées de part et d'autre de l'usine. La sélection d'une machine parmi un ensemble de même type est fonction de la disponibilité ponctuelle réelle de chaque machine. Pour les deux autres cas, un produit est toujours associé au même cheminement. Le deuxième cas considère une sélection grossière, c'est-à-dire la sélection des divers îlots visités pour un produit. Ainsi, la sélection est fonction de l'équipement de production associé à l'opération précédente et suivante. Le troisième cas est relatif à la sélection précise des machines utilisées pour la fabrication du produit. Dans les trois cas, la flexibilité de l'implantation est influencée par le nombre d'îlots pour un même type d'équipement. Dans un but de simplification de gestion, l'analyste opte généralement pour des hypothèses de décision qui ne sont pas nécessairement optimales pour toutes les situations et les périodes de production. Ainsi, la performance de l'implantation face aux besoins du système manufacturier est directement influencée par le nombre d'îlots de production.

Les scénarios proposés sont les actions de base, c'est-à-dire un **statu quo** lorsque l'indicateur calculé respecte les bornes, et une **analyse** dans le cas contraire. L'analyse est directement associée à l'évaluation du niveau de dégradation (ou d'amélioration) de l'implantation. La figure 4.6 résume nos propositions quant aux actions à entreprendre.

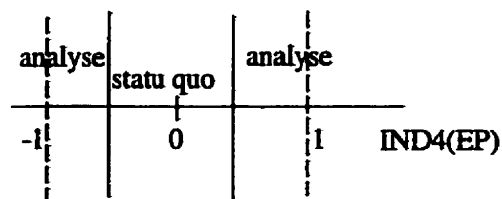


Figure 4.6 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #4

4.6 Le système de manutention

La manutention de la matière première, des en-cours et des produits finis est un élément important lors de l'analyse d'une implantation. Les éléments-types compris à l'intérieur de cette catégorie sont de deux types : les équipements de manutention et les couloirs de circulation. Dans les pages qui suivent, des indicateurs de performance de l'implantation sont présentés. Il sont associés à la distance parcourue, aux retours en arrière, au taux d'utilisation par type d'équipement de manutention, et à l'engorgement d'allées représentant la densité de circulation sur un segment d'allée particulier.

4.6.1 Indicateur #5 - Ratio de distance

La majorité des modèles et des méthodes de construction ou d'amélioration d'une implantation d'usine se base sur les seuls critères de l'intensité de la circulation et de la distance parcourue correspondante. Ces modèles et ces méthodes tentent de minimiser le produit de ces deux variables dans le but d'établir une implantation optimale pour le cas étudié. L'indicateur présenté poursuit cette même ligne de pensée pour l'évaluation d'une implantation. Il représente la proportion de variation de la distance parcourue pour un produit par rapport à la distance parcourue avec une implantation satisfaisante. En association avec l'indicateur #1, le ratio de quantité à fabriquer, ce ratio permet d'évaluer le moment où l'implantation n'est plus adéquate par rapport au graphique Distances-Intensités de circulation.

Lors de l'évaluation des déplacements, il est nécessaire de considérer toutes les directions de circulation, c'est-à-dire les déplacements dans le sens général du flux de production de même que les retours en arrière. Les équations (4.5a) et (4.5b) sont respectivement associées au ratio de distance d'un produit α et d'une famille de produits β .

$$IND5(\alpha) = \frac{\sum_i \sum_j \text{dist}(i, j) * \text{procédé}(\alpha, \beta, i, j)}{\sum_i \sum_j \text{dist}^*(i, j) * \text{procédé}(\alpha, \beta, i, j)} - 1 \quad (4.5a)$$

$$IND5(\beta) = \frac{\sum_p \sum_i \sum_j \text{dist}(i, j) * \text{procédé}(p, \beta, i, j)}{\sum_p \sum_i \sum_j \text{dist}^*(i, j) * \text{procédé}(p, \beta, i, j)} - 1 \quad (4.5b)$$

où $\text{dist}(i, j)$: Distance parcourue entre les machines i et j

$\text{procédé}(p, f, i, j) = 1$ Si le produit p de la famille f nécessite la visite des machines i et j de façon consécutive

$= 0$ Sinon

α : Un produit particulier, constante de l'équation

β : Une famille de produits particulière, constante de l'équation

$*$: Variable associée à l'implantation référentielle

La description qui suit est associée à l'équation (4.5a), le ratio d'un produit par rapport à sa famille. Pour l'équation (4.5b), le ratio d'une famille par rapport à la production totale, le même développement est applicable. Le ratio de distance comporte trois variables : la distance actuelle entre chaque paire de machines, la distance dans des conditions d'optimalité et une variable binaire associée à l'utilisation de deux machines de façon consécutive lors de la fabrication du produit en question. Comme mentionné précédemment, règle générale, cet indicateur est utilisé conjointement avec l'indicateur #1, le ratio de quantité à fabriquer. Dans le cas particulier où la demande est quasi constante pour une longue période, le ratio de distance peut être analysé en solo.

Pour déterminer le degré de variation admissible, il est nécessaire d'énumérer les cas possibles :

- 1) la distance parcourue est satisfaisante, soit équivalente à la valeur du référentiel, soit inférieure;
- 2) la distance parcourue est supérieure à la valeur de référence.

Pour le premier cas, le ratio de distance est équivalent à zéro ou négatif. Une valeur négative signifie une diminution relative de la distance parcourue par rapport au référentiel. Une variation de l'itinéraire peut entraîner un engorgement sur un segment d'allée. Cependant, cette

conséquence est détectée à l'aide du ratio d'engorgement (indicateur #8). Dans le second cas, l'indicateur est strictement supérieur à zéro. Pour cet indicateur, il n'est donc nécessaire d'identifier qu'une seule borne, soit la borne supérieure de la proportion permise de variation.

Comme dans le cas de l'indicateur #1, le coefficient de similarité d'une famille de produits influence l'analyse des résultats pour un produit particulier. La détermination de la limite supérieure doit donc considérer cet aspect. Par exemple, pour une famille β de produits ayant un coefficient de similarité élevé, une variation de la distance pour un produit α de cette famille se répercute nécessairement sur la distance à parcourir pour les autres produits de la même famille β . La situation inverse est aussi observée pour une famille ayant un faible coefficient de similarité.

Pour bien comprendre l'influence de cet indicateur, l'exemple pour l'indicateur #1 - section 4.4.1, est repris et la figure 4.7 complète les données. La circulation se fait de façon rectilinéaire dans les allées.

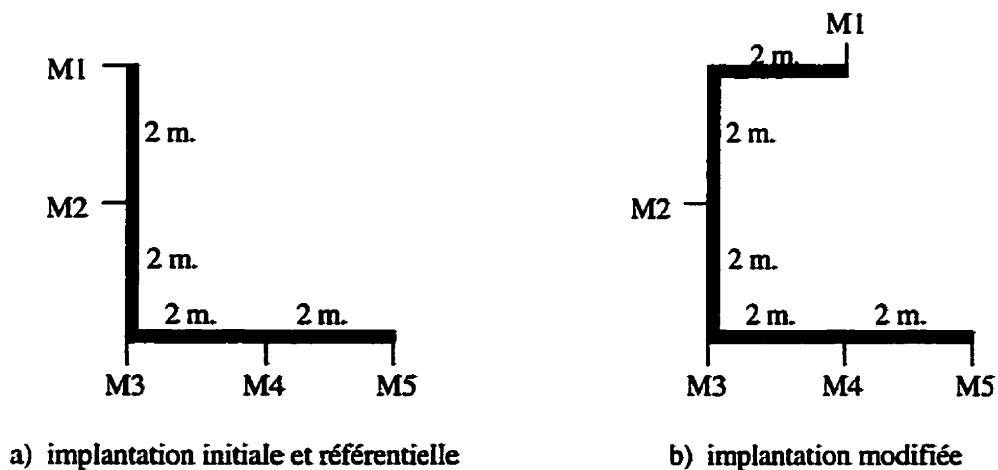


Figure 4.7 Exemple d'implantation a) initiale et b) modifiée pour l'indicateur #5

Si l'implantation initiale (données de 1994) est considérée comme étant le point de référence en fonction de la production actuelle, l'indicateur #5, les ratios de distance, calculés avec l'implantation modifiée, sont de 0,0 pour le produit B, et de +0,25 pour les produits A et C. Une analyse approfondie peut donc être nécessaire pour connaître les causes de cette augmentation de la distance parcourue et évaluer l'impact sur la performance de l'implantation actuelle. Les résultats de l'indicateur #5 peuvent être combinés à ceux de l'indicateur #1. Dans le cas du produit A et pour l'année 1995, il est probable qu'une analyse de l'implantation s'impose puisque l'augmentation de la distance parcourue est combinée à une augmentation de la quantité produite. Pour l'année 1996, l'augmentation de la distance parcourue est contrebalancée par une diminution de la quantité produite. Tel que mentionné précédemment, dans le cas particulier où la demande est quasi constante, il n'est pas nécessaire d'associer la valeur de l'indicateur #1 à ce ratio.

L'intervalle de valeurs possible est $[-1; +\infty[$. Les combinaisons possibles de la variation des deux ratios de cet indicateur, soit le ratio relatif à un produit particulier et le ratio de sa famille, en fonction des bornes prédéterminées sont définies à la figure suivante. Il importe de se rappeler qu'une valeur du ratio de distance positive indique que la distance parcourue est supérieure à la valeur du référentiel.

La figure 4.8 présente trois sous-ensembles de valeurs de l'indicateur #5 : le statu quo, la pertinence des éléments-types et l'analyse. Le **statu quo** est le cas trivial où les bornes supérieures sont respectées.

La notion de **pertinence** est de deux niveaux : i) le produit α par rapport à sa famille β , et ii) la famille β par rapport à la production totale. La pertinence étant reliée à la fonction représentative d'un élément-type, la sélection doit être remise en question lorsque les variations des valeurs du ratio de distance d'un produit α et de sa famille β ne sont pas homogènes. La représentativité de la famille β avec le produit α est d'autant plus discutable si la similitude des procédés de fabrication des produits de cette famille est importante.

Le troisième terme est l'**analyse** des résultats obtenus. Cette analyse est axée sur l'influence des ratios de distance sur la performance de l'implantation face aux besoins actuels, celle-ci pouvant mener à la révision de l'implantation. Pour une production constante, l'augmentation de la distance

parcourue d'un élément-type a pour effet direct une dégradation de la performance globale de l'implantation actuelle. Une analyse est donc nécessaire dans le but de déterminer les causes de cette variation du cheminement des produits et les conséquences relatives à l'implantation actuelle.

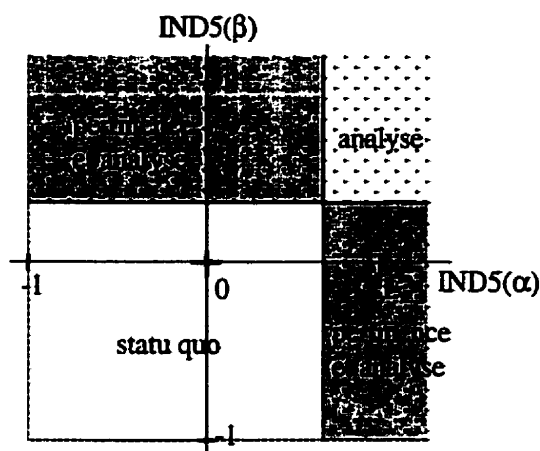


Figure 4.8 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #5

Il est toujours possible de détecter la tendance à la hausse ou à la baisse de cet indicateur. Si tel est le cas, une étude plus approfondie permet de conclure s'il est toujours pertinent d'inclure dans l'analyse cet élément-type et si l'implantation sera influencée par les variations de l'indicateur.

4.6.2 Indicateur #6 - Ratio de retours en arrière

Toute implantation est conçue en établissant une orientation de la circulation. Tompkins et al. (1996) présentent les schémas de réseaux de circulation : en ligne droite, en U, en S et en zigzag. Dans la littérature, il est entendu que la circulation globale des produits doit minimiser les retours en arrière pour faciliter la gestion des déplacements et des engorgements possibles, et par le fait même réduire les coûts de manutention.

Pour une implantation de type par procédés, il est rare que les retours en arrière soient inexistants. Ainsi, il est nécessaire d'établir un indicateur de performance de l'implantation permettant l'évaluation de la proportion des manutentions se faisant dans le sens opposé à la

circulation globale privilégiée, **toujours en excluant les parcours en circuit fermé**. Le suivi périodique de cet indicateur est fait dans le but de déterminer l'efficacité de l'implantation par rapport aux besoins actuels.

Pour l'ensemble du système de fabrication, le produit du nombre d'unités de charge manutentionnées par la distance parcourue associée à un retour en arrière est évalué. La proportion de retours en arrière est le ratio de cette valeur sur la distance totale parcourue pour l'ensemble des produits. La définition d'une famille de produits étant basée sur la similitude des procédés de fabrication, il n'est pas utile d'évaluer ce ratio pour un produit particulier en fonction de sa famille, ou pour une famille en fonction de la production totale. Cet indicateur de performance est donc utilisé pour l'évaluation des retours en arrière de la production globale.

La définition du ratio de retours en arrière comporte les variables associées à la distance parcourue et la quantité d'unités à manutentionner entre deux équipements de production, et ce pour tout les produits en-cours. Les changements se rapportant à la structure de produits, aux procédés de fabrication et à l'implantation physique des équipements de production affectent cet indicateur. L'établissement de l'équation de cet indicateur de performance est donc fonction de la position relative des équipements de production à l'intérieur de l'implantation actuelle.

Tompkins et al. (1996) présentent des exemples de circulation générale en positionnant les postes d'entrée/sortie et en établissant le sens de la circulation générale entre ces deux points. Il en résulte des allées où la circulation n'est permise que dans un sens, soit les allées principales, et un sous-ensemble d'allées de circulation bidirectionnelle, soit les allées secondaires. Dans le premier cas, un déplacement d'un produit particulier dans le sens opposé de l'allée implique directement un retour en arrière. Dans le second cas, un retour en arrière est observé lorsqu'il y a plus de deux utilisations d'un même segment d'allée, toujours pour un même produit.

Les coordonnées de chacun des équipements de production doivent être connues a priori pour l'évaluation de cet indicateur de performance de l'implantation. Ce ratio est donc fonction des cheminements parcourus pour une période de production particulière, et ce pour l'ensemble des produits. La méthode de gestion des îlots de production, c'est-à-dire des équipements de production n'étant pas localisés au même endroit que leur famille respective, peut influencer la valeur du ratio de

retours en arrière. Cependant, seule une simulation des diverses combinaisons de cheminements des produits permet d'évaluer le degré d'influence de la politique de gestion de production face aux variations de cet indicateur.

L'équation (4.6) résume les calculs à effectuer pour l'évaluation de l'indicateur de performance de l'implantation relatif aux retours en arrière. Rappelons que les trajets de produits en circuit fermé sont définis comme ne faisant pas partie de déplacements avec retours en arrière. Dans cette équation, la sommation pour tous les $j < i$ au numérateur représente tous les déplacements qui ne respectent pas le sens général du flux, c'est-à-dire les retours en arrière.

$$IND6 = \frac{\sum_f \sum_p \sum_o \sum_i \sum_{j < i} \text{dist}(i, j) * UC(p, f, o, i) * \text{procéd}(p, f, i, j)}{\sum_f \sum_p \sum_o \sum_i \sum_j \text{dist}(i, j) * UC(p, f, o, i) * \text{procéd}(p, f, i, j)} - \text{Retour}^* \quad (4.6)$$

- où : $\text{dist}(i, j)$: Distance parcourue entre les machines i et j
- $\text{procéd}(p, f, i, j) = 1$ Si, le produit p de la famille f , nécessite la visite des machines i et j de façon consécutive
- $= 0$ Sinon
- Retour^* : Proportion des retours en arrière, pour le référentiel
- $UC(p, f, o, m)$: Unités de charge manutentionnées pour le produit p de la famille f après l'opération o sur la machine m , par unité de temps

Une méthodologie d'évaluation de cet indicateur de performance est présentée à l'annexe 3. Une analyse du réseau de couloirs de l'implantation et des itinéraires des produits permet l'identification des allées principales et secondaires et des itinéraires, ou segments d'itinéraires, en circuit fermé. Basé sur ces données, la distance parcourue pour les retours en arrière et la distance totale parcourue sont calculées.

Les résultats de cette équation sont toujours inclus dans l'intervalle $[-1; +1]$. La réduction de la proportion de retours en arrière par rapport au référentiel n'apporte que des effets bénéfiques sur l'efficacité de l'implantation en fonction du système de production. Par conséquent, seule la borne supérieure doit être déterminée. Au-delà de cette limite, la probabilité que les retours en arrière aient

une influence négative est considérée importante. Cet indicateur de performance de l'implantation est basé sur la distance totale parcourue puisqu'une distance élevée d'un retour en arrière peut être contrebalancée par une faible quantité d'unités à manutentionner. Pour ce cas particulier, les effets négatifs d'engorgement d'allées sont amoindris.

Les causes de la variation de cet indicateur peuvent être difficiles à établir puisque le ratio de retours en arrière est influencé par plusieurs paramètres tels que la structure de produits, les procédés de fabrication et la localisation relative des équipements de production. La figure 4.9 résume les actions à initier en fonction de divers résultats obtenus lors de l'évaluation de cet l'indicateur.

Les actions proposées, relatives aux valeurs de l'indicateur par rapport aux limites établies, sont les mêmes que celles présentées précédemment. En effet, le respect de la borne supérieure permet un **statu quo** de l'implantation actuelle. Inversement, le non respect de cette borne entraîne une **analyse** de la dégénérescence de l'implantation par rapport aux déplacements. Les conséquences peuvent être associées à l'implantation, à la gestion globale de la production, à la structure de produits, aux procédés de production d'un produit particulier, à la sélection d'une machine appartenant à un type pour la production d'un produit, et autres. L'évaluation périodique doit aussi inclure une identification des tendances à la hausse ou à la baisse de la valeur de cet indicateur de performance de l'implantation.

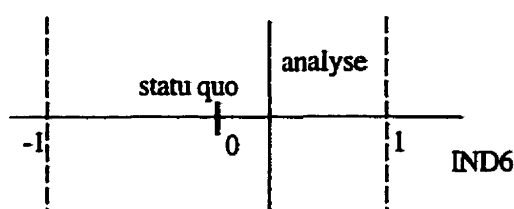


Figure 4.9 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #6

4.6.3 Indicateur #7 - Ratio de manutention

Cet indicateur permet de déterminer le taux d'utilisation moyen d'un type particulier d'équipement de manutention. Celui-ci ne peut être évalué de la même façon qu'un équipement de production. En effet, l'analyse du statut d'un équipement de production est basé sur l'emploi standard

de feuilles de route pour chaque lot de pièces en fabrication. Cet outil de gestion de la production est grandement utilisé, et ce dans tout type d'entreprise manufacturière. Il est donc aisé de déterminer les temps totaux d'utilisation d'un type de machine. À l'opposé, les informations d'utilisation associées à un type d'équipement de manutention sont rarement établies et compilées de façon standard. Une technique d'échantillonnage est donc préconisée pour l'analyse, soit la méthode des observations instantanées, permettant la détermination de l'usage moyen d'un type particulier d'équipement de manutention.

Une étape préliminaire à l'analyse est l'établissement des paramètres suivants : la durée de l'intervalle d'observations, le nombre d'observations nécessaires et les instants d'observations. L'intervalle d'observations est défini comme une période de durée fixe supérieure ou égale à la durée minimale d'un cycle complet de production. Il est considéré qu'un cycle de production est associé au délai maximal de production de l'ensemble des produits. Le délai de production d'une unité inclut les temps nécessaires à l'exécution de toutes les opérations de transformation, les temps de manutention, et les durées d'attente et d'entreposage en cours de production. La sélection du nombre d'observations nécessaires doit permettre la validation de l'emploi de la méthode d'échantillonnage pour l'évaluation de cet indicateur. Aussi, la détermination des instants d'observations est nécessairement aléatoire. L'analyste doit porter une attention particulière à l'établissement des valeurs de ces paramètres puisque la validité des résultats de l'évaluation du ratio de manutention est directement influencée par ces paramètres.

Les variations détectées par l'évaluation du ratio de manutention peuvent être de divers types :

- 1) une hausse du niveau de manutention pour un type de produit, soit :
 - en fonction de l'unité de charge,
 - en fonction de la demande;
- 2) une augmentation de la durée de manutention due :
 - à une modification partielle de l'implantation,
 - à la sélection d'un différent chemin;
- 3) une variation de la performance de l'équipement évalué;

- 4) un changement de gestion des différents types d'équipement de manutention;
- 5) l'achat, le retrait ou le remplacement d'un équipement de manutention;
- 6) un changement dans la gamme de fabrication d'un produit.

Seule une analyse permet de déterminer la cause exacte d'une variation de cet indicateur et par la suite, d'établir les actions à initier.

Deux situations peuvent se présenter en entreprises. La première, implique l'utilisation d'équipements de manutention pour des sections particulières de production, soit une délimitation de zones de manutention. Dans ce cas, il est suggéré d'appliquer l'équation du ratio de manutention en fonction de chacune des zones. La seconde situation est associée à l'utilisation des divers équipements de manutention à l'intérieur de toutes les sections de la production. Basé sur notre enquête du chapitre 6, nous constatons que cette deuxième situation est la plus commune en entreprise manufacturière. Il n'est donc pas pertinent d'évaluer l'indicateur par zone de manutention puisque toutes les activités de production de l'entreprise sont regroupées sous une seule zone. L'équation suivante présente l'indicateur de performance relatif au taux d'utilisation d'un type EM d'équipement de manutention.

$$IND7(EM) = \frac{\sum_{obs} \sum_{m \in EM} Ofabrication(m, obs)}{\#obs * nbre(EM) - \sum_{obs} \sum_{m \in EM} Ohs(m, obs)} - T^*(EM) \quad (4.7a)$$

où #obs : Nombre d'observations instantanées effectuées au cours d'un intervalle

nbre (EM) : Nombre d'équipements de manutention de type EM

$Ofabrication(m, obs) = 1$ Si l'équipement m à l'observation obs est en état de fonctionnement ou d'activité accessoire

$= 0$ Sinon

$Ohs(m, obs) = 1$ Si l'équipement m à l'observation obs est hors service

$= 0$ Sinon

$T^*(EM)$: Proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement de type EM en fonction du temps disponible, pour le référentiel

Le premier terme de l'équation identifie la proportion du temps où un équipement de manutention de type EM est utilisé : en déplacement, que ce soit avec du matériel ou à vide pour un chargement (identifié par le temps accessoire), ou pour la prise/dépose de chargements.

De même que pour l'indicateur #3, le ratio de fonctionnement pour les équipements de production, la valeur de cet indicateur est directement reliée au type d'équipement analysé. Par exemple, un chariot élévateur fonctionnant à batterie rechargeable nécessite un certain temps de recharge en plus des temps associés aux entretiens et bris. En contrepartie, les temps d'arrêts d'un transpalette manuel sont seulement associés à l'entretien régulier et aux bris. Aussi, un suivi de la maintenance des équipements est essentiel.

L'équation (4.7b) présente l'indicateur de performance de l'implantation relatif au taux de fonctionnement d'un type d'équipement de manutention lorsque les informations d'utilisation peuvent être compilées. Actuellement en entreprises, une des variables rarement disponible pour un équipement de manutention est le temps accessoire. Considérant que la notion de feuille de route peut être extrapolée pour le suivi d'un équipement de manutention, l'équation suivante peut être applicable. Le ratio calculé est donc un différentiel entre la proportion du fonctionnement pour le référentiel et celui actuel.

$$IND7(EM) = \frac{\sum_{m \in EM} \sum_f \sum_p UC(p, f, o, m) * Tusage(p, f, o, m)}{\sum_{m \in EM} \{Tdisp(m) - \%Ths(m) * Tmanut_total(m)\}} - \sum_p T^*(m) \quad (4.7b)$$

où : $\%Ths(m)$: Pourcentage théorique du temps hors service pour l'équipement m

$T^*(m)$: Proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement m
en fonction du temps disponible, pour le référentiel

$Tdisp(m)$: Temps disponible pour l'équipement m

$Tmanut_total(m)$ = Somme des temps de manutention de l'équipement m

$$= \sum_f \sum_p \sum_o UC(p, f, o, m) * Tmanut(p, f, o, m)$$

$Tmanut(p, f, o, m)$: Temps de manutention associé au produit p de la famille f
après l'opération o par l'équipement m

- Tusage (p,f,o,m)** : Somme des temps de manutention et des temps accessoire (transport à vide, prise/dépose) associés au produit p de la famille f pour le transport après l'opération o avec l'équipement m
- UC (p,f,o,m)** : Unités de charge manutentionnées pour le produit p de la famille f après l'opération o sur la machine m, par unité de temps

L'intervalle de valeurs possibles est $[-1; +1]$ pour l'une ou l'autre équation du ratio de manutention. La borne supérieure est associée à une utilisation maximale (strictement inférieure à 100%) et équivalente au différentiel maximal permis par rapport au référentiel. Pour sa part, la borne inférieure est influencée par le nombre d'équipements d'un même type. Le domaine de solutions et des actions à entreprendre est présenté à la figure suivante.

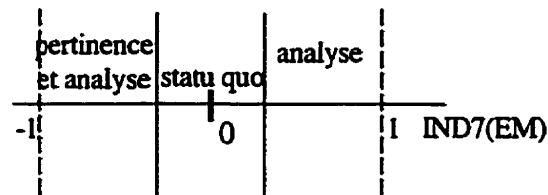


Figure 4.10 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #7

Ce ratio permet de faire le suivi, pour un type EM d'équipement de manutention, de la variation de divers paramètres qui lui sont directement reliés, soit le taux d'utilisation et le taux d'arrêts pour cause de pannes, de bris, d'entretien, de nettoyage ou autres. Par extrapolation, il peut être intéressant d'évaluer cet indicateur pour un équipement particulier par rapport à l'ensemble des équipements de même type. Cette analyse a pour but de détecter un changement dans la gestion des équipements de manutention ou un arrêt excessif dudit équipement. Basé sur les hypothèses initiales d'une utilisation uniforme des équipements de manutention et d'une gestion de type non dédié, ce cas spécifique ne sera pas analysé de façon plus détaillée.

L'évaluation de cet indicateur comporte aussi la détermination d'une tendance générale à la hausse ou à la baisse de l'utilisation du type EM d'équipement de manutention. Ce signal, associé aux résultats potentiels futurs, permet une gestion proactive de l'élément manutention relatif à la performance de l'implantation par rapport aux besoins.

4.6.4 Indicateur #8 - Ratio d'engorgement

Le facteur d'engorgement d'allées de circulation est peu utilisé dans la littérature en tant qu'indice de performance de l'aménagement actuel. Cependant, l'influence de la circulation globale sur la production prend plusieurs formes. La vitesse de déplacement des produits est directement reliée au taux de circulation sur un segment d'allée. Ainsi, plus l'achalandage d'une allée est important, plus la vitesse de croisière est modérée. Il y a aussi une question de sécurité, tant à l'échelle du travailleur que de la matière en mouvement. La probabilité d'endommager un produit est d'autant plus grande que la circulation est dense dans le couloir emprunté pour son déplacement.

Il est important de souligner que les effets de l'engorgement d'un segment d'allée se manifestent non pas lors de l'atteinte du seuil de capacité mais plutôt de façon graduelle. L'analyste doit donc bien saisir la portée de l'influence de la densité de circulation sur le rendement de l'implantation pour la détermination du taux de circulation satisfaisant d'un segment d'allée particulier.

Un autre élément à considérer lors de l'analyse de l'implantation est le type d'engorgement identifié par la variation de cet indicateur soit un engorgement sectoriel, soit un engorgement pondéré. L'engorgement sectoriel est défini comme un important degré de circulation dans une zone particulière de l'atelier. Dans ce cas, les actions à entreprendre peuvent être associées à une modification des cheminements des matières dans un but d'uniformisation de l'utilisation des segments d'allée. L'engorgement pondéré est associé à l'ensemble des segments d'allée. Il peut avoir pour conséquence directe la révision de l'implantation.

Pour une utilisation adéquate de cet indicateur, il est important de bien définir une unité de charge temporelle commune à tous les déplacements des produits. L'unité la plus utilisée est sans contredit la palette, à l'heure ou à la journée. Pour divers produits, la taille de lot peut varier.

Cependant, il est essentiel de garder en mémoire que l'élément d'analyse visé par cet indicateur est le mouvement de matière. L'indicateur proposé représente la distance totale parcourue par l'ensemble des produits sur un segment d'allée particulier, et ce pour un intervalle de temps de durée prédéterminée. L'équation tient compte de la notion de retours en arrière lors des déplacements de produits. La figure 4.11 présente tous les cas possibles de déplacements à partir desquels l'équation (4.8) relative à l'indicateur d'engorgement du segment d'allée θ est dérivée. Cette équation est définie comme suit.

$$\text{IND8}(\theta) = \frac{\sum_f \sum_p \sum_o \sum_i \sum_j D(i,j) * \text{UC}(p,f,o,i) * \text{procédé}(p,f,i,j)}{\text{densité}^*(\theta)} - 1 \quad (4.8)$$

où $\text{densité}^*(\theta)$: Densité référentielle du segment d'allée θ , exprimée en terme d'unités de charge * unités de distance / unité de temps

$D(i,j)$: Distance parcourue entre les machines i et j

= $\text{dist}(i,j) - \text{MIN} \{ \text{dist}(\text{Début},j); \text{dist}(\text{Fin},j) \}$ pour tout $i \in \theta$ et $j \notin \theta$

= $\text{dist}(i,j) - \text{MIN} \{ \text{dist}(i,\text{Début}); \text{dist}(i,\text{Fin}) \}$ pour tout $i \notin \theta$ et $j \in \theta$

= $\text{dist}(i,j)$ autrement

où Début et Fin représentent les points extrêmes du segment d'allée θ

$\text{procédé}(p,f,i,j) = 1$ Si le produit p de la famille f nécessite la visite des machines i et j de façon consécutive

= 0 Sinon

$\text{UC}(p,f,o,m)$: Unités de charge manutentionnées pour le produit p de la famille f après l'opération o sur la machine m , par unité de temps

θ : Un segment d'allée particulier, constante de l'équation

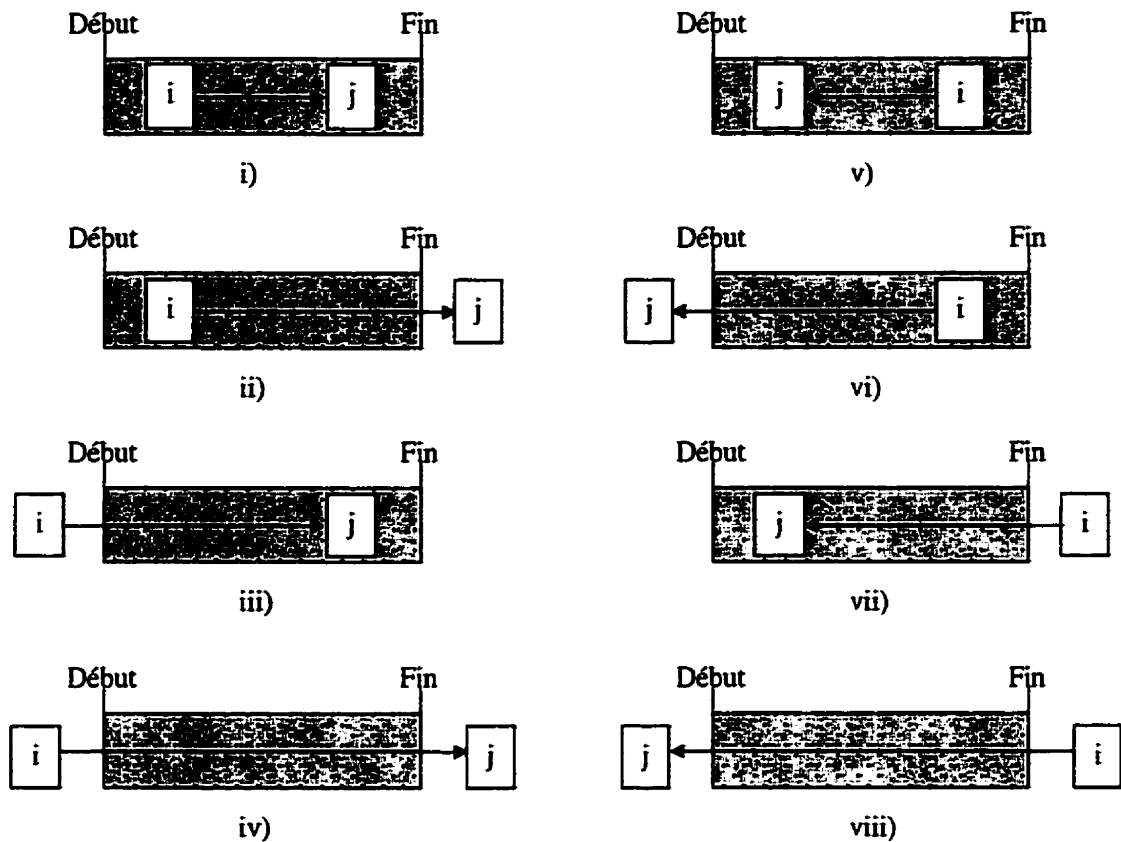


Figure 4.11 Cas possibles de positionnement de machines sur un segment d'allée pour l'indicateur #8

Le premier cas de la figure 4.11 représente deux opérations consécutives *i* et *j* étant effectuées à des postes de travail localisés sur un même segment d'allée. Ce segment est identifié par ses points de début et de fin. De plus, le flux entre les opérations *i* et *j* est du même sens que la circulation générale de production. Basé sur cette définition, les autres cas peuvent aisément être déduits.

Les déplacements considérés dans ce ratio sont tous les mouvements de produits originant de ou destinés à une activité de transformation située sur le segment d'allée étudié, ainsi que les déplacements de produits qui utilisent le segment sans toutefois s'y arrêter. Par définition, un

segment d'allée permet de desservir un sous-ensemble d'activités. Considérant une implantation satisfaisante par rapport au flux de production, il est réaliste de prétendre que la majorité des produits sont manutentionnés sur de faibles distances. Ainsi un raffinement approprié du découpage des segments d'allée a pour conséquence des valeurs nulles ou quasi nulles pour les cas iv) et viii).

Une analyse des résultats obtenus en fonction de l'implantation actuelle est déclenchée par une variation hors borne de cet indicateur. La figure 4.12 présente de façon schématique le domaine de solutions possibles ainsi que les mesures proposées. L'intervalle de valeurs possibles est $[-1; +\infty[$ avec des valeurs probables situées dans l'intervalle $[-1; +1]$.

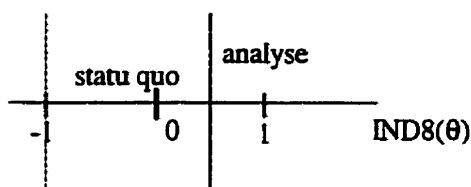


Figure 4.12 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #8

Cet indicateur de performance est tributaire de la variation de la quantité fabriquée, de la taille de lot de manutention, de l'unité de charge temporelle sélectionnée, de la capacité de circulation d'un segment d'allée, et d'autres. Par conséquent, l'analyse des résultats n'entraîne pas nécessairement une révision de l'implantation actuelle. Diverses actions peuvent être initiées, encore une fois selon un engorgement sectoriel ou pondéré, comme :

- 1) l'utilisation de différents chemins,
- 2) une révision des unités de charge manutentionnées,
- 3) une variation de la largeur de segments d'allée,
- 4) l'utilisation d'un équipement de manutention fixe,
- 5) une réaffectation de produits à des équipements de production particuliers,
- 6) une révision de la localisation d'une ou quelques machines,

- 7) un changement quant à la gestion de manutention ou de production,
- 8) une uniformisation de la circulation par rapport au temps total de production,

L'analyse de tendances potentielles à la hausse ou à la baisse de la variation de l'indicateur doit aussi être effectuée pour chacune des évaluations périodiques de l'implantation.

4.7 La gestion de production

L'évaluation de la performance de l'implantation en fonction des politiques de gestion de production comporte deux indicateurs. Ceux-ci sont associés à l'espace d'entreposage des en-cours et à l'horaire de travail.

4.7.1 Indicateur #9 - Ratio d'entreposage

Cet indicateur de performance de l'implantation comporte les paramètres associés aux espaces d'entreposage officiels et non officiels des produits en-cours seulement. L'évaluation périodique des aires d'entreposage des matières premières et des produits finis ne fait pas partie de l'objectif visé par cet indicateur. Celui-ci est directement influencé par le type de gestion appliqué à l'entreposage des en-cours. En effet, les matières premières sont, règle générale, placées dans un entreposage dédié, et ce jusqu'au moment de leur utilisation pour la fabrication d'un produit. Ainsi, les matières premières ne sont présentes qu'à certains postes de production et tout type de gestion tente de minimiser l'espace utilisé par les matières premières dans l'atelier. Il en va de même pour les produits finis. Au même titre que les lieux d'entreposage dédiés, les lieux d'entreposage non officiels doivent être inclus dans ce ratio. Ces espaces de stockage peuvent être un bout d'allée de circulation, une aire de travail d'un équipement de production, une semi-remorque stationnée à un quai de livraison, et autres. Lors de l'évaluation périodique de cet indicateur de performance de l'implantation, il est important de bien déceler tous les espaces utilisés à des fins d'entreposage, qu'ils soient permanents ou temporaires, officiels ou non.

De façon plus générale, une variante de cet indicateur peut évaluer le ratio de l'entreposage des en-cours en fonction de tout type de produit (matières premières, en-cours et produits finis). Le suivi de ce ratio n'est pas nécessaire puisque l'établissement de l'implantation initiale est précédé d'une analyse préliminaire approfondie de la production dans le but d'optimiser les performances de l'implantation. La gestion de l'entreposage est choisie en fonction des besoins de la production. La gestion des matières premières et des produits finis peut grandement influencer l'efficacité de l'entreposage. Par exemple, un nombre élevé d'unités en entrepôt d'un produit considéré désuet limite l'espace disponible pour l'entreposage d'un autre produit. Il est donc important de bien connaître la demande pour chacun des produits de façon à bien gérer l'achat de matières premières et la production d'unités.

L'objectif de l'évaluation du ratio d'entreposage est double. Premièrement, ce ratio doit permettre d'identifier toute variation qui ne respecte pas le référentiel d'entreposage officiel permis. En effet, il est irréaliste de penser qu'un entrepôt peut être utilisé à pleine capacité puisqu'une variation de la demande ou de la production, que ce soit relatif à la quantité ou des délais, a une influence certaine sur le taux d'utilisation des entrepôts. Deuxièmement, ce ratio est associé à la détection de l'utilisation d'espaces d'entreposage dits non officiels en fonction de la politique de gestion de l'entreposage en application. Les causes de l'emploi d'espaces d'entreposage non officiels sont de deux natures : les espaces officiels d'entreposage sont insuffisants par rapport à la quantité d'en-cours, et des espaces non officiels sont utilisés au détriment des espaces officiels disponibles. Le tableau suivant résume les trois cas permis (A, B et C) de gestion de l'entreposage.

Tableau 4.6 Identification des cas permis pour l'indicateur #9

DÉFINITION DES CARACTÉRISTIQUES	CAS		
	A	B	C
Respect du référentiel d'entreposage officiel disponible	X	X	X
Entreposage non officiel permis :			
- et respect du ratio référentiel des espaces non officiels en fonction des officiels	X	X	
- si et seulement si l'entreposage officiel est entièrement utilisé		X	
Entreposage non officiel interdit			X

Le type de gestion de l'entreposage, soit dédié, soit aléatoire et soit dédié par classe de produits, influence les résultats de l'évaluation de cet indicateur. Il est important de souligner que l'évaluation du ratio d'entreposage est fonction d'une unité de charge commune à tous les produits. Cette hypothèse est réaliste puisque qu'une uniformisation de la manutention est couramment appliquée en entreprises manufacturières où, par exemple, l'unité de manutention utilisée est la palette. Étant donné qu'il est difficile de combiner en une seule équation l'évaluation de l'espace officiel et non officiel, deux paramètres sont définis à l'équation (4.9). Le premier paramètre, V1, représente, pour l'entreposage officiel, le ratio de la proportion actuelle en fonction de la proportion admissible du référentiel. Le second paramètre, V2, est associé à l'entreposage non officiel.

$$\begin{aligned}
 V1 &= \frac{\text{officiel (occupé)} / \text{officiel (total)}}{\text{officiel}^*} \\
 V2 &= \frac{\text{autre (occupé)} / \text{officiel (occupé)}}{\text{entrepôt}^*}
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

- où : autre (occupé) : Espace d'entreposage non officiel des en-cours actuellement utilisé
- entrepôt^{*} : Proportion admissible de l'espace non officiel sur l'espace officiel associée au référentiel
- ∈]0; 1[pour les cas A et B
- = 0 pour le cas C
- officiel^{*} : Proportion admissible de l'espace d'entreposage disponible des en-cours associée au référentiel
- ∈]0; 1[pour tous les cas
- officiel (occupé) : Capacité d'entreposage officiel des en-cours actuellement utilisée
- officiel (total) : Capacité d'entreposage officiel des en-cours

L'intervalle de valeurs possibles pour V1 et V2 est [0; +∞[. La borne supérieure du ratio d'entreposage fait partie intégrante des paramètres V1 et V2 et est représentée par deux termes : la proportion de l'espace d'entreposage disponible du référentiel (officiel^{*}), et la proportion admissible

du référentiel associé à l'espace non officiel sur l'espace officiel (entrepôt^{*}). Aussi, il est superflu de déterminer une borne inférieure de variation pour cet indicateur de performance. En effet, toute valeur de V1 et V2 inférieure à un indique que l'entrepôt est sous-utilisé par rapport au référentiel. La figure 4.13 présente le domaine de solutions et les actions à entreprendre. Pour tous les cas, le **statu quo** est de mise lorsque l'évaluation des deux paramètres a pour résultat une valeur inférieure à un. Une **analyse** de l'un ou l'autre ou les deux paramètres est initiée pour toute autre valeur. Finalement, l'analyse des tendances est faite pour chacun des paramètres V1 et V2 de cet indicateur.

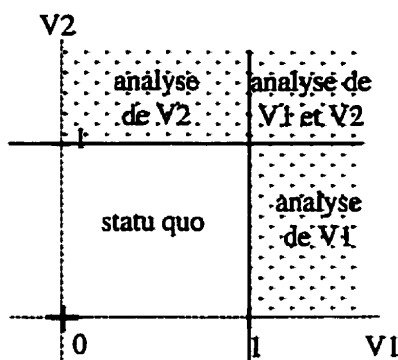


Figure 4.13 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #9

4.7.2 Indicateur #10 - Ratio de l'horaire de travail

Cet indicateur de performance de l'implantation a pour objectif de détecter les changements associés à l'horaire de travail des employés de production. Le ratio est basé sur un horaire de travail initial qui est considéré optimal par rapport à la production actuelle. Le suivi périodique permet donc de repérer les variations positives ou négatives des heures utilisées pour la transformation des produits et pour les tâches connexes. Le temps total de travail pour les employés est directement affecté par une variation ou un changement de gestion de la production. En effet, il est généralement plus aisé de répondre efficacement à la demande en variant les heures de travail des employés que de modifier l'implantation en fonction des équipements de production. Les

principaux avantages de cette option sont que la modification peut être temporaire et qu'il n'y a peu ou pas de capital à investir, contrairement à l'ajout ou retrait d'un équipement de production.

Le ratio de l'horaire de travail peut être employé de façon globale ou de façon plus spécifique, c'est-à-dire en fonction de toutes les opérations de transformation ou en fonction d'une catégorie d'employés. La gestion des coûts relatifs au travail en sous-traitance est un exemple d'application du suivi périodique d'une catégorie particulière d'employés. Le degré de détails pour l'application de cet indicateur est donc fonction des objectifs visés lors de l'évaluation périodique de l'implantation.

Les variations de cet indicateur sont de deux types, soit en fonction de l'horaire de travail, soit en fonction du nombre d'employés. L'horaire de travail est associé aux heures travaillées en temps régulier, en temps partiel, en temps supplémentaire et en temps de sous-traitance **pour la transformation de produits**. Il est important de souligner que les temps de travail ne sont associés qu'aux heures effectivement utilisées pour la production. Il est possible que la gestion d'une diminution de la demande n'entraîne pas de réduction des heures totales de travail mais seulement une réaffectation des employés à d'autres activités. Si les nouvelles tâches ne sont pas directement reliées à la production, cette redistribution de tâches des employés est représentée par une variation du ratio de l'horaire de travail.

Les employés sont divisés en plusieurs catégories relatives à chaque classe de temps de travail. Le produit de ces deux variables, le temps de travail et le nombre d'employés par catégorie, permet donc de déterminer le nombre total d'heures effectivement utilisées pour une période particulière de production. Aussi, les fluctuations de la valeur du ratio de l'horaire de travail peuvent être causées par l'automatisation de certaines opérations de production, par un enrichissement de tâche pour une catégorie particulière d'employés, par une variation de la production soit de façon ponctuelle, pour satisfaire une demande temporaire, ou soit de façon permanente, et ainsi de suite. Les indicateurs reliés au ratio de l'horaire de travail sont définis à l'aide des équations (4.10a) pour une catégorie e d'employés et (4.10b) pour la production globale.

$$IND10(\varepsilon) = \frac{\text{temps}(\varepsilon) * \text{empl}(\varepsilon)}{\text{temps}^*(\varepsilon) * \text{empl}^*(\varepsilon)} - 1 \quad (4.10a)$$

$$IND10 = \frac{\sum_x \text{temps}(x) * \text{empl}(x)}{\sum_x \text{temps}^*(x) * \text{empl}^*(x)} - 1 \quad (4.10b)$$

où $\text{empl}(x)$: Nombre d'employés de production disponibles et associés au type x
d'heure de travail

$\text{temps}(x)$: Heures de travail utilisées pour la production et associées au type x
d'employé

x = Temps régulier, partiel, supplémentaire et de sous-traitance

ε : Une catégorie particulière d'employés, constante de l'équation

$*$: Variable associée à l'implantation référentielle

Par définition, l'intervalle de valeurs possibles est $[-1; +\infty[$. La détermination des limites admissibles est fonction de tous les cas possibles : i) somme des heures inférieure au référentiel, ii) somme des heures équivalente au référentiel et, iii) somme des heures supérieure au référentiel. Pour les deux premiers cas, les modifications associées aux variations de cet indicateur ne sont que bénéfiques dans un contexte de production à quantité constante. La détermination de la borne supérieure de variation de cet indicateur de performance s'applique donc pour le dernier cas seulement. Règle générale, les heures de production varient d'une période à une autre; ainsi, la valeur de la borne supérieure doit laisser une certaine latitude quant aux variations possibles.

La détermination des actions à entreprendre présentée à la figure 4.14 est dans le cas particulier où la production est constante. Dans le cas contraire, le détail est présenté dans la section de l'analyse combinée de ce chapitre, pour la combinaison des indicateurs #1 et #10, soit le ratio de quantité à fabriquer et le ratio de l'horaire de travail.

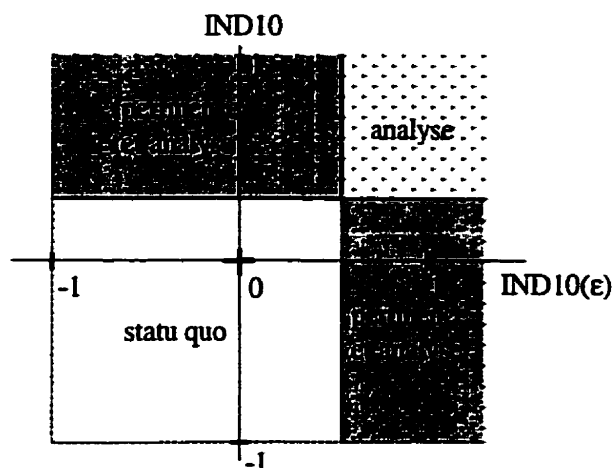


Figure 4.14 Schéma du domaine de solutions pour l'indicateur #10

Basé sur l'hypothèse que le ratio de quantité à fabriquer est constant pour les périodes de production analysées, l'augmentation du ratio de l'horaire de travail peut avoir plusieurs causes. L'analyse, lorsque la valeur calculée est hors borne, peut avoir pour résultat une révision de l'implantation, une remise en cause de la performance d'une catégorie d'employés, l'évaluation de la fiabilité d'un ou de plusieurs équipements de production, la pertinence de la gestion de production en application, et autres. Aussi, il peut être intéressant d'évaluer l'impact d'un transfert de personnel d'une catégorie à une autre. Par exemple, le temps supplémentaire nécessaire à la production peut être remplacé par l'embauche d'un employé à temps régulier. La fatigue accumulée lors de temps supplémentaires est éliminée et il est possible que l'employé régulier soit plus consciencieux et efficace pour l'accomplissement de ses tâches. Cette analyse de la gestion de main-d'oeuvre doit être effectuée lors de toute déviation de l'indicateur #8, le ratio d'engorgement, par rapport à la limite supérieure prédéterminée.

Il est toujours conseillé d'évaluer les résultats en considérant la notion de tendance.

4.8 Analyse combinée des indicateurs

Les sections précédentes présentant des propositions d'indicateurs de performance d'une implantation, des exemples de combinaisons d'indicateurs sont proposés dans un but d'analyse de certains items relatifs à l'implantation. Selon l'objectif du suivi périodique, les éléments-types à évaluer sont identifiés et la sélection des indicateurs de performance de l'implantation pertinents pour l'analyse est basée sur ceux-ci.

Une combinaison importante est l'évaluation de l'indicateur #5, le ratio de distance, en association avec l'indicateur #1, le ratio de quantité à fabriquer. Ce binôme fait le lien avec la fonction-objectif communément utilisée par les modèles ou méthodes pour la conception ou l'amélioration d'une implantation, soit la minimisation du produit de la distance par le flux. Parmi les cas possibles de variations des indicateurs, une augmentation simultanée du ratio de production et du ratio de distance nécessite une analyse des causes de cette variation et des effets sur l'implantation. Comme pour l'analyse indépendante de chacun de ces ratios, il est essentiel de garder en mémoire le rôle important de la valeur du coefficient de similarité pour la famille de produits étudiée lors de l'analyse des résultats. Les sections relatives à chaque indicateur explique les effets du degré de similitude des produits de même famille sur la valeur des indicateurs.

Les résultats présentés pour le ratio de distance (indicateur #5) peuvent être analysés en parallèle avec les résultats du ratio de dispersion des équipements (indicateur #4). Le type d'équipement de production étudié doit bien entendu faire partie du processus de fabrication de la famille de produits sous analyse. Une augmentation du ratio de distance combinée à un statu quo ou une augmentation du ratio de dispersion implique une analyse permettant l'identification des causes de cette variation. Par opposition, une augmentation du ratio de dispersion des équipements combinée à un statu quo du ratio de distance peut impliquer une performance satisfaisante de l'implantation. Dans ce cas, la dispersion des machines de même type par rapport à la surface de fabrication n'entraîne pas d'effets néfastes. Il est important de bien identifier les bornes pour chacun des indicateurs puisque ceux-ci sont associés, entre autre, au type d'implantation préconisé. Par exemple, le modèle d'aménagement holographique introduit par Marcotte et Montreuil (1995) est basé sur la notion de dispersion préméditée des équipements de fabrication dans un but de

flexibilité de la production. Dans ce cas, les bornes de l'indicateur de dispersion des équipements ne sont pas les mêmes que pour une implantation de type par procédés.

Le ratio d'engorgement (indicateur #8) peut être étudié conjointement avec le taux de fonctionnement (indicateur #3), avec le ratio de retours en arrière (indicateur #6), ou avec le ratio de manutention (indicateur #7). La première option de combinaison permet d'évaluer si l'augmentation du ratio d'engorgement d'allées est associée à une augmentation de la fabrication d'éléments-types de production, ce qui est généralement le cas. Ainsi, une analyse permet d'identifier les conséquences de cette variation et d'y associer des recommandations relatives à l'implantation pour uniformiser la production et la circulation dans les allées. Cette hausse du niveau d'activités à un poste de travail peut être la conséquence de la modification de la gestion de production ou de manutention, d'une réaffectation de produits sur diverses machines, du niveau de disponibilité de certains équipements de production, de la formation des manutentionnaires, et autres. Les actions à initier peuvent être une révision de l'implantation actuelle, l'achat d'équipements de production, l'élargissement d'un segment d'allée, et ainsi de suite. Inversement, un statu quo du ratio d'engorgement combiné à une augmentation hors borne du ratio de capacité de production peut être détecté. La solution sélectionnée pour remédier à la situation, comme l'achat d'un nouvel équipement de production ou l'utilisation d'un service de sous-traitance, n'a pas le même impact sur un niveau moyen de circulation que sur un niveau élevé de circulation. Aussi, un statu quo peut être décrété pour une augmentation de ce ratio qui respecte la borne supérieure. L'analyse combinée de ces deux indicateurs permet donc d'établir la relation entre la capacité de production et la circulation dans les allées pour l'évaluation de la performance de l'implantation.

La seconde combinaison, l'évaluation simultanée de l'engorgement d'allées (indicateur #8) et le niveau de retours en arrière (indicateur #6), permet d'ébaucher des solutions potentielles d'implantations adéquates. La variation du ratio de retours en arrière influence directement l'utilisation de certains segments d'allée de circulation. En effet, une implantation étant aménagée avec un objectif de flux global continu, un retour en arrière d'une famille de produits double sa circulation sur certains segments d'allée. Lors d'une hausse notable de l'un des deux ratios, il est généralement approprié d'étudier en premier lieu les causes de la variation des retours en arrière et les effets négatifs sur la circulation et par conséquent, sur la performance de l'implantation. Les

effets peuvent être concentrés à un ou à quelques segments d'allée, ou à l'opposé, répartis sur l'ensemble des segments d'allée. Pour le premier cas, l'influence de la gestion de production peut facilement être interprétée. Pour le second cas, l'analyse de cette augmentation doit être détaillée, et les causes associées et les effets sur l'implantation ne sont pas toujours évidents.

La troisième combinaison fait le lien entre le ratio d'engorgement de segments d'allée de circulation (indicateur #8) et le ratio de manutention (indicateur #7). Cette analyse combinée permet d'établir un lien direct entre le taux d'utilisation des équipements de manutention et le cheminement parcouru pour les déplacements. Les causes d'une augmentation de ces deux indicateurs doivent être déterminées et les effets sur la performance de l'implantation détaillés. Des solutions comme un réaménagement partiel de l'implantation ou une uniformisation de la circulation dans les diverses allées peuvent être appliquées, toujours dans le but d'obtenir une implantation adéquate en fonction des besoins. Une variation dans un sens opposé de ces indicateurs implique la sélection d'un autre chemin, la diminution d'utilisation d'un type d'équipement de manutention au détriment d'un autre type, l'augmentation du nombre de manutentions gérées par un autre type d'équipement, ou autres. Le taux de fonctionnement (indicateur #3) permet de compléter l'analyse. La dégradation de la performance de l'implantation, déterminée par l'augmentation simultanée de ces trois indicateurs, peut avoir pour cause l'augmentation de la fabrication d'un produit (ou famille de produits) particulier. Ainsi, ce sous-ensemble d'éléments reliés à cette production doit être analysé dans le but de déterminer s'il est toujours pertinent de respecter un statu quo relatif à l'implantation. Par exemple, la sélection d'un équipement de manutention de type fixe et dédié à ce produit peut être une solution permettant de rétablir un niveau acceptable de la performance de l'implantation.

Selon l'objectif visé et la variabilité de la structure de produits en fonction du temps, il peut être avantageux d'étudier le ratio de l'horaire de travail (indicateur #10) en combinaison avec le ratio de quantité à fabriquer (indicateur #1). Une diminution des heures de travail combinée à une diminution de la production globale est logique. Par contre, une variation dans un sens opposé du ratio de l'horaire de travail par rapport au ratio de production peut impliquer une remise en question de l'utilisation de l'un ou l'autre des indicateurs de performance. Les causes de cette variation contradictoire peuvent être de plusieurs natures : automatisation de la production, qualification et

efficacité du personnel, courbe d'apprentissage de tâches, meilleure gestion des temps de production en fonction des temps non productifs (mise en course, entretien et autres), emploi d'un service de sous-traitance spécialisé, et ainsi de suite.

Le ratio de procédé de fabrication (indicateur #2) peut être analysé conjointement avec le ratio de distance (indicateur #5) ou le taux de fonctionnement (indicateur #3). Les conséquences de la modification d'un procédé de fabrication pour un produit particulier peuvent être atténuées par un respect des bornes pour l'indicateur #5 ou #3. Pour le premier cas, un respect de la distance admissible à parcourir pour la famille de produits implique que les coûts de manutention restent du même ordre de grandeur. En complément, une évaluation du ratio d'engorgement d'allées (indicateur #8) permet de tracer un portrait d'ensemble des effets de cette variation sur l'implantation. Pour le second cas, il est nécessaire de vérifier si la modification du procédé de fabrication n'entraîne pas d'augmentation notable de l'utilisation de certains équipements de production pour la fabrication de la famille de produits étudiée, à un point tel qu'un nouveau goulot de production est créé et que la performance de l'implantation est remise en question.

Le tableau 4.7 présente un résumé des actions à entreprendre pour les exemples de combinaisons d'indicateurs de performance décrits précédemment. Les symboles \uparrow , \downarrow et $-$ désignent respectivement une hausse hors bornes, une diminution hors bornes et un respect des bornes.

Le point essentiel à retenir d'une combinaison d'indicateurs est que les résultats d'un indicateur affectent la lecture des résultats d'un autre. Ici aussi, le suivi d'une tendance des valeurs des indicateurs doit être effectué. Finalement, l'expertise de l'analyste est essentielle quant à l'analyse des résultats et quant aux actions à entreprendre.

Tableau 4.7 Exemples d'actions à entreprendre pour des combinaisons d'indicateurs

COMBINAISONS	TYPES DE VARIATIONS								
	↑ & ↑	↑ & -	↑ & ↓	- & ↑	- & -	- & ↓	↓ & ↑	↓ & -	↓ & ↓
IND5 & IND1 ¹	A(j)	S	S	P(i)	S	P(j)	n.a.	n.a.	n.a.
IND5 & IND4 ²	A(i)	A(i)	A(i,j)	S	S	S	n.a.	n.a.	n.a.
IND8 & IND3	A(i,j)	A(i)	A(i)	A(j)	S	P(j)	n.a.	n.a.	n.a.
IND8 & IND6	A(i,j)	A(i)	n.a.	S	S	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
IND8 & IND7	A(i,j)	A(i)	A(i,j)	A(j)	S	S	n.a.	n.a.	n.a.
IND10 & IND1	S	A(i)	P(j)	S	S	P(j)	n.a.	n.a.	n.a.
IND2 & IND5	A(i,j)	A(i)	n.a.	A(j)	S	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
IND2 & IND3	A(i,j)	A(i)	A(i)	A(j)	S	P(j)	n.a.	n.a.	n.a.

S : statu quo

A(x) : analyse de l'indicateur x, où x = i pour le premier indicateur de la combinaison
x = j pour le second indicateur de la combinaison

P(x) : pertinence de l'indicateur x, où x = i pour le premier indicateur de la combinaison
x = j pour le second indicateur de la combinaison

n.a. : non applicable dû à la définition des bornes

¹ Le coefficient de similarité influence les résultats d'analyse

² Le type d'implantation préconisé affecte la détermination des bornes.

Ce ne sont là que quelques exemples de combinaisons des indicateurs de performance de l'implantation dans le but d'analyser de façon efficace les effets sur l'implantation des variations de la production. Tel que mentionné précédemment, le choix des indicateurs de performance de l'implantation pour une évaluation périodique est fonction de l'objectif visé. Aussi, divers critères associés au système manufacturier doivent être évalués pour la sélection des indicateurs. Le tableau 4.8 présente un exemple d'une série de critères à évaluer et les indicateurs concernés.

Tableau 4.8 Exemples de critères à considérer pour la sélection d'indicateurs

CRITÈRES	INDICATEURS À CONSIDÉRER	INDICATEURS NON SIGNIFICATIFS
Type de systèmes de production : <ul style="list-style-type: none"> • pur • mixte : analyse de tout le système analyse d'une partie pure 	7, 8 5, 8 <i>voir système pur</i>	4
type d'implantation : <ul style="list-style-type: none"> • par produits • par familles de produits • par processus opératoires • par postes fixes • cellulaire • holographique • micro-usine 	 6, 9 4, 6, 9 7 4, 6 6	2, 4, 5, 6, 7, 9 4 4, 5, 6, 7, 9 4, 6 4, 5
type de systèmes de circulation : <ul style="list-style-type: none"> • direct • indirect : canalisé centralisé 	 4	4, 6 5, 6
type de systèmes de manutention : <ul style="list-style-type: none"> • équipement avec cheminement fixe • équipements mobiles 	 5, 6, 7, 8	4, 5, 6

D'autres critères comme l'unité de charge de manutention, la courbe de vie des produits, la variabilité des estimés de production ou de la structure de produits doivent être considérés lors de la sélection des indicateurs de performance.

4.9 Conclusion

Le problème du design d'implantation d'usine suscite beaucoup d'intérêt. La majorité des modèles et des techniques présentés dans la littérature ont pour objectif la conception ou

l'amélioration d'une implantation, que ce soit dans un environnement statique ou dynamique. Certains auteurs vont un peu plus loin dans leur démarche et discutent de l'évaluation d'une implantation actuelle dans le but de déterminer le moment propice à sa révision. Par contre, aucun auteur ne propose de démarche particulière d'évaluation comportant une mise en équation d'indicateurs.

Pour combler cette lacune, des indicateurs sont élaborés pour l'évaluation périodique de la performance de l'implantation. Ces indicateurs font appel à la notion d'éléments-types introduite au chapitre précédent. Ils sont regroupés en quatre thèmes définissant un système manufacturier, soit les produits, les équipements de production, le système de manutention et la gestion de production. Le tableau 4.9 présente, par thème définissant le système à l'étude, des exemples d'éléments-types et les indicateurs de performance de l'implantation.

Tableau 4.9 Exemples d'éléments-types et d'indicateurs de performance de l'implantation, par thèmes

THÈMES	ÉLÉMENTS-TYPES	INDICATEURS
Produits	<ul style="list-style-type: none"> • séquence des opérations • complexité de la gamme • niveau de qualité • volume de production 	<ul style="list-style-type: none"> • ratio de quantité à fabriquer • ratio de procédé de fabrication
Production	<ul style="list-style-type: none"> • taux d'utilisation • flexibilité • qualité des extrants 	<ul style="list-style-type: none"> • taux de fonctionnement • ratio de dispersion des équipements
Manutention	<ul style="list-style-type: none"> • taux d'utilisation • flexibilité • densité de flux • retours en arrière • engorgement sectoriel ou pondéré • redondance des chemins 	<ul style="list-style-type: none"> • ratio de distance • ratio de retours en arrière • ratio de manutention • ratio d'engorgement

Tableau 4.9 Exemples d'éléments-types et d'indicateurs de performance de l'implantation, par thèmes (suite)

THÈMES	ÉLÉMENTS-TYPES	INDICATEURS
Gestion de production	<ul style="list-style-type: none"> • taille de lots • gestion de files d'attente • manutention sur appel ou par anticipation • politique d'entreposage : dédié, aléatoire, ou autre 	<ul style="list-style-type: none"> • ratio d'entreposage • ratio de l'horaire de travail

Les indicateurs élaborés sont dédiés à l'évaluation de la performance de l'**implantation**. De façon complémentaire, des mesures d'évaluation, associées à des indicateurs de performance de **production**, sont proposées par divers auteurs. Aussi, Lin et Sharp (1999a et b) discutent de l'établissement des critères d'évaluation d'**alternatives d'aménagement**. Ces critères sont repris et adaptés, lorsqu'applicable, au problème d'évaluation **périodique de l'implantation**.

Toutes les équations associées aux divers indicateurs de performance sont définies sous forme de ratio et présentées à l'aide de cartes de contrôle. Une déviation de la valeur calculée au-delà de bornes prédéfinies implique soit une analyse des causes de cette variation, celle-ci pouvant avoir pour conséquence une révision partielle ou complète de l'implantation, soit une remise en question quant à la pertinence de l'évaluation périodique de cet indicateur.

Ainsi, lors d'une analyse de la production, la sélection des paramètres significatifs pour le cas étudié est faite à partir des différents thèmes. Selon l'objectif visé, la combinaison d'indicateurs choisis est différente. La sélection de plusieurs indicateurs à l'intérieur d'un même thème permet de faire un suivi attentif dudit thème. D'un autre côté, la sélection d'indicateurs associés à chaque thème permet un suivi général du système manufacturier, toujours dans l'optique de l'évaluation de la performance de l'implantation par rapport aux besoins. Par conséquent, il est important de bien identifier l'objectif visé avant la détermination des indicateurs à analyser.

La sélection d'éléments-types du chapitre précédent et d'indicateurs proposés dans ce chapitre permet d'évaluer de façon périodique la performance de l'implantation dans le but d'évaluer le moment propice à sa révision. Le chapitre suivant présente une méthodologie d'application ainsi qu'un exemple complet basé sur un cas tiré de la littérature que nous avons enrichi. Le cas permet la validation de la méthodologie proposée. À titre de rappel, l'annexe 4 présente un tableau récapitulatif des équations et leur domaine de solution associé pour tous les indicateurs de performance proposés.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE ET ANALYSE D'UN CAS

5.1 Introduction

Tous les éléments d'analyse étant présentés dans les chapitres précédents, une méthodologie est maintenant proposée, permettant de relier ces composantes à l'intérieur d'une procédure d'évaluation périodique de l'implantation actuelle. Avant même de passer à l'étape de sélection des éléments-types et des indicateurs de performance, il est nécessaire d'analyser le système manufacturier à l'étude et d'en diminuer sa complexité, si possible. Cette simplification comporte la création de familles de produits. Shafer et Rogers (1993) insistent sur la nécessité de simplifier le problème mais ils ne proposent pas de méthode particulière. Kusiak et Cho (1992) présentent une méthode de simplification pour le cas où un seul processus de transformation est étudié pour chaque produit de la gamme. Ainsi, un produit ayant toutes ses opérations incluses dans le processus d'un second produit est éliminé de l'analyse puisqu'il est considéré de la même famille que le second produit. Ce chapitre débute donc par une discussion sur différents modèles et techniques de regroupement de produits et de machines présentés dans la littérature. La sélection des éléments-types représentant les produits est basée sur les résultats générés à cette étape préliminaire d'analyse. Il va sans dire qu'une entreprise ayant déjà une définition adéquate de familles de produits peut se soustraire à l'exécution de cette étape.

Par la suite, la méthodologie développée pour l'évaluation périodique de l'implantation est présentée. À l'intérieur de celle-ci, la notion d'étalonnage concurrentiel ("benchmarking") est discutée. Finalement, la méthodologie proposée est validée, basée sur un cas tiré de la littérature que nous avons enrichi. La validation a pour objectif de déterminer si les indicateurs proposés au chapitre précédent permettent la détection de changements associés à la performance de l'implantation.

5.2 Modèles et techniques de regroupement des produits et des machines

On présente ici une revue de la littérature associée aux modèles et aux techniques permettant le regroupement des produits et des machines. Cette section comporte les catégories de modèles et de techniques, divers critères considérés lors de l'élaboration des modèles et des méthodes, et les objectifs les plus utilisés. La sélection de l'un ou l'autre des modèles ou méthodes est laissée à la discrétion de l'analyste.

Pour tout type d'entreprise ayant une gamme de produits qui lui est propre, il est souvent de mise de regrouper les produits par famille. Les modèles et les techniques de regroupement associés au domaine de production présentés dans la littérature sont de trois natures, selon une classification générale :

- 1) regroupement simultané des machines et des produits,
- 2) regroupement de machines, suivi de la mise en famille des produits,
- 3) regroupement de produits, suivi de la mise en cellule des équipements de production.

Les premières méthodes retrouvées dans la littérature sont associées à la première catégorie. Elles utilisent la permutation de lignes et de colonnes de la matrice de contingence. Ainsi, les cellules de production et les familles de produits sont définies concurremment. La seconde catégorie permet d'établir en premier lieu l'aménagement des équipements de production, et plus particulièrement de définir les cellules de fabrication. En se basant sur les cellules formées, les familles de produits sont identifiées. La troisième catégorie est associée aux opérations inverses, soit l'identification a priori des sous-ensembles de produits comportant des opérations similaires et, par la suite, la création des cellules de fabrication.

De façon plus spécifique, deux approches sont présentées dans la littérature pour la mise en familles des produits : a) la méthode basée sur les caractéristiques des produits, la plus

connue étant celle d'Opitz et Wiendahl (1971), et b) la méthode basée sur la gamme de production. Nous nous attarderons à la seconde approche puisque celle-ci est associée aux divers processus de fabrication des produits. Basé sur les travaux de Gupta et Seifoddini (1990), Srinivasan et Narendran (1991) proposent une classification, présentée au tableau 5.1, des divers types de modèle et de méthode pour la résolution du problème de regroupement. Rappelons que l'élément $A(i,j)$ d'une matrice de contingence a une valeur égale à un si le procédé de fabrication du produit i comporte l'utilisation de la machine j , et une valeur nulle autrement. Aussi, le coefficient de similarité est relié à la corrélation entre les produits de même famille. Un coefficient élevé, tendant vers un, définit une forte similitude des produits. Cette similitude peut être associée aux machines utilisées, aux processus opératoires, aux caractéristiques physiques des produits, ou autres, selon la définition utilisée par les divers auteurs.

Tableau 5.1 Types de méthodes pour le regroupement basé sur la gamme de production, Srinivasan et Narendran (1991)

Méthodes basées sur la matrice de contingence machine-composant :	
1) Analyse du flux de production :	
	Méthode d'analyse visuelle de la matrice
2) Analyse du regroupement machine-composant :	
	Méthode itérative de permutation des lignes et des colonnes de la matrice
Autres méthodes :	
3) Analyse des coefficients de similarité :	
	Méthode itérative de regroupement basée sur une comparaison numérique de toutes combinaisons de paires d'éléments
4) Analyse basée sur la théorie des graphes	
5) Analyse basée sur la programmation mathématique	

Pour une meilleure représentativité de la variabilité d'une gamme de produits, l'établissement de sous-ensembles de produits devrait être fait en fonction de la définition des opérations nécessaires à la transformation d'un produit, et non en fonction des équipements de

production actuellement utilisés. Ceci est toujours dans l'optique où un système de production comporte plusieurs équipements de production ayant la capacité d'effectuer un sous-ensemble d'opérations identiques. La majorité des modèles et des techniques présentés dans la littérature fait état de l'utilisation d'un équipement particulier pour la réalisation d'une opération. À la limite, un bris de longue durée ou la mise au rancart d'une machine nécessite une réaffectation des produits utilisant cette machine pour une ou plusieurs opérations. L'établissement des familles en fonction des opérations permet de réorienter rapidement et efficacement les produits vers les équipements appropriés. Il n'est pas dit que tous les produits sont affectés à la même machine. Aussi, il est primordial que les gammes de fabrication sélectionnées pour chacun des produits soient bel et bien celles utilisées en atelier. Cette concordance entre les données utilisées et la réalité est essentielle à une gestion efficace de l'implantation.

D'autres modèles permettent de gérer la capacité des machines, les coûts d'opération et de manutention, les temps d'opération, le parc-machines existant ou le dédoublement des machines. Ces paramètres sont associés au regroupement de machines par cellules de fabrication, soit un objectif secondaire à notre analyse. En effet, selon la gestion de l'implantation (par cellules de fabrication, par procédés, ou autres), les familles de produits sont les mêmes mais les regroupements d'équipements sont différents. Il suffit donc de fractionner les familles dans un but de production, c'est-à-dire l'affectation de produits d'une même famille à différentes machines pouvant effectuer les mêmes opérations tout en considérant la contrainte de capacité des machines.

Considérant qu'il existe dans la littérature d'autres types de technique basés sur différentes approches, telles que la théorie des graphes et l'intelligence artificielle, les modèles et les techniques sont catégorisés selon le type d'approche utilisé. Le tableau 5.2 résume la division des catégories. Il est important de souligner que les catégories 2, 3 et 4 proposées peuvent utiliser une méthode de calcul basée sur la matrice de contingence ou sur l'évaluation de coefficients de similarité.

**Tableau 5.2 Classification des modèles et des techniques de résolution
du problème de regroupement**

- 1) Méthodes heuristiques
 - i- Basées sur des manipulations de la matrice de contingence
 - ii- Basées sur le calcul de coefficients de similarité
- 2) Méthodes exactes d'optimisation
- 3) Théorie des graphes
- 4) Intelligence artificielle

Le premier thème de la classification des modèles et des techniques de résolution pour le problème de regroupement est strictement associé à un regroupement (simultané ou indépendant) des produits et des machines pour la formation de cellules de fabrication, soit la première nature des méthodes de regroupement de la classification générale. Les autres catégories sont utilisées pour un regroupement consécutif de produits et de machines, ou vice et versa, soit les natures 2) et 3) de la classification générale, et ce selon la méthode de regroupement appliquée. L'annexe 5 comporte, pour chacun des thèmes de la classification, une discussion sur les différents modèles et techniques de regroupement élaborés au fil des années.

Les objectifs les plus utilisés pour la résolution du problème de regroupement sont :

- 1) la minimisation des déplacements intercellulaires, intracellulaires, ou les deux;
- 2) la maximisation de l'utilisation des machines;
- 3) la minimisation des éléments nuls des cellules formées;
- 4) la maximisation du nombre d'opérations de tout produit dans une cellule;
- 5) la minimisation de la duplication des machines;
- 6) la minimisation de la somme des coûts opérationnels, fixes et de manutention.

Aussi, l'utilisation de méthodes de regroupement de type non hiérarchique est préconisée. Par définition, une méthode de type hiérarchique ne permet pas de reprendre le processus de regroupement à une itération antérieure. L'affectation d'un produit à une famille particulière, ou d'une machine à une cellule, est établie une fois pour toute au cours du processus. Seules les méthodes exactes d'optimisation de la classification proposée (tableau 5.2) peuvent être qualifiées de non hiérarchique. Pour toutes les autres classes, le type est une caractéristique qui est fonction de l'algorithme développé par chacun des auteurs.

La maximisation, de façon globale, de la similarité de toutes paires d'éléments regroupés semble être une fonction-objectif valable. Des paramètres comme le type, la séquence et le rang des opérations doivent être considérés. Shiko (1992) a développé une équation de coefficient de similarité qui tient compte de ces paramètres. Cette fonction-objectif peut aussi se traduire par la minimisation des déplacements intercellulaires et des retours en arrière à l'intérieur d'une famille de produits, ou encore par la maximisation de la similitude des gammes de fabrication pour toutes familles.

Soulignons qu'il existe d'importants critères à considérer pour le regroupement. Parmi ceux-ci :

- 1) la gestion efficace de la séquence des opérations;
- 2) les différentes gammes viables de fabrication;
- 3) les coûts pour les variations de procédés dans une même famille de produits ("skipping machine costs").

La séquence des opérations et les différentes gammes de production d'un produit sont des paramètres importants lors du regroupement en familles. Pour un produit particulier, peu de variantes de la gamme de production sont possibles puisque, lors de la sélection d'un processus de fabrication d'un produit, l'entreprise n'investit que dans l'achat d'outils pour ce procédé. Par contre, la flexibilité du système de production peut avoir pour conséquence différentes gammes de fabrication pour un même produit.

Pour une plus grande flexibilité, la méthode devrait permettre la création d'une famille fictive regroupant tous les produits de fabrication non standards. Relativement à l'implantation, cette famille fictive peut être associée à un type par procédés. En effet, Burgess et al. (1993) mettent un bémol sur l'emploi de la technologie de groupes en entreprises car il y a toujours la fluctuation du volume de production et surtout, les situations typiques en industries sont hybrides, c'est-à-dire qu'une entreprise manufacturière comporte à la fois un sous-ensemble de produits pouvant être regroupés, et un autre associé à la fabrication de produits disparates. Ils stipulent que moins de cinquante pour-cent des extrants d'une entreprise peuvent être regroupés en cellules de fabrication. Il y a donc nécessité de création de cellules virtuelles de fabrication. Co et Araar (1988) présentent une méthode où ils proposent la création d'une cellule fictive permettant de regrouper tous les produits ne pouvant être reliés à une cellule de production régulière, ou à une famille particulière. Ces produits sont donc fabriqués dans la section de l'usine de type par procédés.

Pour compléter la méthode de regroupement, le volume de fabrication de chaque produit, défini en fonction de son stage associé à son cycle de vie commerciale, peut être pris en compte. Par opposition, les méthodes de regroupement basés sur la capacité de fabrication considèrent une structure de produits constante pour la période étudiée. Il est considéré que la variabilité des volumes de production est nécessaire à la détermination du produit représentatif de sa famille, c'est-à-dire un élément-type.

Une fois les regroupements définis, il est important d'évaluer leur performance, que ce soit lors de leur création ou de façon périodique. La performance des regroupements est définie par l'évaluation du degré d'appartenance des produits d'une même famille. Comme souligné par Kusiak et Cho (1992) et par Sarker et Yu (1994), la définition de produits-goulots doit être considérée, au même titre que celle de machines-goulots. Ainsi, un produit peut être considéré comme un goulot d'étranglement de la production si la définition de son procédé de fabrication est associée à plus d'une famille ou cellule.

Divers auteurs présentent des paramètres de performance de regroupement permettant de qualifier les solutions générées pour le problème de regroupement de produits, de machines, ou les deux. McCormick et al. (1972) introduisent une mesure de performance associée à la séquence de liens pour toutes les opérations effectuées sur les différentes machines. ("Total Bond Energy"). Chandrasekharan et Rajagopalan (1986) présentent une mesure "d'efficacité" pondérée du regroupement, c'est-à-dire le taux d'utilisation des machines et le degré de densité des groupes. La mesure d'efficacité de regroupement de Kumar et Chandrasekharan (1990) est une variante de cette mesure d'efficacité. Le pourcentage d'exceptions de Shafer et Rogers (1993), et son complémentaire, l'index de capacité de regroupement de Seifoddini et Hsu (1994) sont des mesures de performance simplifiées et globales.

5.3 Méthodologie proposée pour l'évaluation de l'implantation

La méthodologie d'analyse de l'implantation fait appel aux notions d'éléments-types et d'indicateurs présentées respectivement aux chapitres 3 et 4. L'établissement d'un sous-ensemble d'éléments-types permet la définition agrégée du système de production à l'étude, et un sous-ensemble d'indicateurs de performance, l'évaluation périodique de l'implantation. Trois catégories distinctes d'étapes faisant partie de la méthodologie proposée et menant à l'évaluation périodique de l'implantation sont définies. La première catégorie, **Étude initiale**, a pour but la définition du système manufacturier à étudier. Une étape d'optimisation du système permettant d'établir le référentiel d'évaluation de la performance de l'implantation est incluse dans cette catégorie. Le regroupement des produits en familles est une étape préliminaire permettant l'agrégation du système. La seconde catégorie, **Angle d'analyse**, permet d'établir les objectifs propres à une analyse de la performance de l'implantation. Selon l'objectif poursuivi, certaines fonctions du système, définies par un sous-ensemble d'éléments-types et des indicateurs de performance de l'implantation appropriés, sont sous observation. Par exemple, l'angle d'analyse peut avoir pour objectif d'évaluer :

- 1) l'influence d'une famille-clé et de machines critiques sur la production,
- 2) l'impact de la variation du taux de production sur le niveau d'entreposage des matières,

- 3) l'impact de la variation des retours en arrière sur le niveau d'engorgement sectoriel.

Il est important de mentionner que l'analyse sous un angle particulier ne considère l'évaluation que de certains éléments-types et indicateurs propres à l'objectif visé. La dernière catégorie, **Analyse**, comporte toutes les étapes d'exécution du suivi de la performance de l'implantation selon les critères établis. Cette analyse est effectuée de façon itérative à intervalles réguliers ou aléatoires. Elle permet de détecter des changements majeurs de la performance de l'implantation par rapport aux besoins de la production, c'est-à-dire une variation au-delà de limites prédéfinies. Une analyse des résultats peut être l'origine d'une révision partielle ou complète de l'implantation. Parallèlement à cette analyse périodique de la performance de l'implantation, il est nécessaire de remettre en question l'objectif visé puisque les résultats peuvent s'avérer non significatifs pour cause de constance ou, à l'opposé, d'un trop haut degré de variabilité ou autre raison. Le tableau 5.3 résume toutes les étapes proposées pour chacune des catégories de la méthodologie proposée.

Tableau 5.3 Méthodologie d'évaluation périodique d'une implantation d'usine

Étude initiale :	
1 ^{re}	Définition du système manufacturier actuel
2 ^{re}	Optimisation globale des performances du système
3 ^{re}	Établissement de l'implantation référentielle
Angle d'analyse :	
4 ^{re}	Définition de l'objectif poursuivi pour l'évaluation de l'implantation
5 ^{re}	Sélection des paramètres d'analyse en fonction de l'objectif visé : <ul style="list-style-type: none"> 1) les éléments-types 2) les indicateurs de performance 3) les bornes
6 ^{re}	Établissement de la méthode de collecte de données : <ul style="list-style-type: none"> 1) les intervalles d'évaluation 2) le responsable des évaluations

Tableau 5.3 Méthodologie d'évaluation périodique d'une implantation d'usine (suite)

Analyse :	
7 ^e	Évaluation périodique des indicateurs de performance de l'implantation
8 ^e	S'il y a variation hors bornes, des actions peuvent être initiées comme : <ul style="list-style-type: none"> 1) Analyse des causes et des conséquences sur la performance de l'implantation, 2) Révision de la sélection des éléments-types, 3) Modification de l'implantation en fonction des recommandations proposées, 4) Révision des indicateurs influencés par les modifications apportées à l'implantation.
	Sinon :
	<ul style="list-style-type: none"> 1) Statu quo, 2) Détection de la possibilité de tendance des indicateurs,
9 ^e	Remise en question de l'objectif de l'étude

Dans un but de compréhension de l'étape de sélection des paramètres d'analyse, et plus particulièrement des indicateurs de performance de l'implantation, un exemple est présenté. Cet exemple propose, selon un objectif particulier, une sélection potentielle d'indicateurs de performance de l'implantation qui se complètent et qui s'opposent (confrontation).

Pour l'objectif : Évaluation de l'utilisation d'un équipement mobile de manutention en fonction du volume de production

Les indicateurs sélectionnés peuvent être :

Indicateur #1 - Ratio de quantité à fabriquer

Indicateur #5 - Ratio de distance

Indicateur #6 - Ratio de retours en arrière

Indicateur #7 - Ratio de manutention

Indicateur #8 - Ratio d'engorgement

Cet objectif permet le suivi périodique d'indices permettant d'évaluer la pertinence de l'implantation par rapport aux besoins du système. Par exemple, une sur-utilisation de l'équipement de manutention a peut-être pour cause des volumes de production plus importants, de différentes unités de charge, des distances plus longues ou de différents trajets.

Les équations proposées pour les indicateurs de performance de l'implantation sont facilement informatisables; de ce fait, le suivi périodique en est facilité. Il est considéré qu'il n'est pas profitable d'utiliser les notions d'analyse multicritère, telle que la technique connue de Brown & Gibson. En effet, l'application d'une technique d'analyse multicritère nécessite a priori la détermination de l'importance relative de chacun des indicateurs sélectionnés. Aussi, les bornes inférieure et supérieure étant propres à chaque indicateur, il est difficile d'établir une équation tenant compte de tous ces facteurs. Il est plus simple et plus réaliste de calculer, à l'aide de moyens automatisés, les différents indicateurs de performance et, par la suite, de combiner les résultats. Une table décisionnelle peut être générée permettant la simplification de l'analyse préliminaire comme l'exemple présenté au tableau 4.7. Elle représente tous les cas possibles de combinaisons des indicateurs sélectionnés et les actions à entreprendre pour chacun. Dans un même ordre d'idées, un système expert peut être exploité, de même que les notions d'ensembles flous.

Parallèlement à cette analyse périodique de la performance de l'implantation, il est nécessaire de remettre en question l'objectif visé (étape 9), et par conséquent les paramètres étudiés, qui sont les éléments-types sélectionnés et les indicateurs. La méthodologie élaborée permet donc d'identifier le moment propice à la révision d'une implantation basé sur le degré de dégradation de celle-ci. Dès lors, les modèles et les techniques de design d'implantation peuvent être utilisés dans le but d'optimiser les changements à effectuer à l'implantation face aux nouveaux besoins du système de production. Aussi, le suivi d'indicateurs de performance de l'implantation permet d'identifier les tendances et les problèmes potentiels associés à l'implantation actuelle.

En complément à cette méthodologie, les notions d'étalonnage concurrentiel peuvent être applicables, toujours dans un but d'évaluation de la performance de l'implantation face aux besoins du système. L'étalonnage concurrentiel permet une comparaison des résultats de l'évaluation de la performance de l'implantation avec un échantillon. Celui-ci peut être interne et relié à une autre fonction de l'entreprise, externe et relié à une fonction de même type, ou autre. L'étalonnage concurrentiel permet donc de situer la performance actuelle de l'implantation par rapport à la performance d'un autre système. Karlöf et Östblom (1995) présentent trois aspects de l'étalonnage concurrentiel :

- 1) la qualité : valeur du produit ou service définie par le client, quel que soit son coût de production (notions d'Analyse de la Valeur);
- 2) la productivité : "... art de produire un volume donné avec un apport minimum de ressources...";
- 3) le temps : unité commune aux notions de qualité et de productivité; objectif commun à plusieurs études d'étalonnage concurrentiel, par exemple, la réduction des délais de fabrication, de livraison.

Aussi, ils proposent trois catégories d'étalonnage concurrentiel :

- 1) interne : la comparaison des performances des filiales, des groupes de services d'une même entreprise, et ce pour des opérations de même nature. Les résultats obtenus sont une uniformisation du niveau de performance, toujours en fonction des rendements "élites" de l'entreprise;
- 2) externe : la comparaison d'organisations similaires ou identiques, soit les concurrents directs ou des entreprises desservant d'autres marchés. L'étude, pour être effective, doit être axée sur les performances d'excellence et non sur les facteurs de concurrence des entreprises;

- 3) **fonctionnelle** : la comparaison de produits, services et processus de travail avec les meilleures entreprises, quel que soit le secteur d'activités de celles-ci. L'objectif de ce type d'étude est l'identification des comportements associés à l'excellence.

De façon plus détaillée, l'American Productivity & Quality Center (1993) définit quatre types d'étude comparative en étalonnage concurrentiel pour des partenaires potentiels :

- 1) des études internes,
- 2) des études compétitives,
- 3) des études fonctionnelles ou d'industrie,
- 4) des études génériques.

Une **étude interne**, c'est-à-dire dans le cadre des fonctions d'une entreprise, compare des opérations similaires entre elles. Une **étude compétitive**, souvent effectuée par une tierce entité, compare les informations relatives aux produits, aux procédés ou aux méthodes de gestion pour des entreprises associées à un même secteur d'activités. L'étalonnage concurrentiel de performance de Bogan et English (1994), axé sur la comparaison de produits et des services, peut être associé à ce type d'étude. Une **étude fonctionnelle** permet la comparaison de fonctions similaires d'une entreprise par rapport à une autre de haut calibre. Bogan et English (1994) définissent ce niveau comme étant l'étalonnage concurrentiel de procédés. Finalement, une **étude générique**, l'étalonnage concurrentiel stratégique de Bogan et English (1994), est associée à la comparaison d'industries n'appartenant pas au même secteur d'activités. Des extrapolations de méthodes de travail sont initiées et peuvent avoir pour conséquence un changement de mentalité quant à la gestion de l'entreprise et une augmentation de la performance de cette entreprise.

En complément aux différents types d'étalonnage concurrentiel, Bogan et English (1994) définissent sept niveaux de performance de l'étalonnage concurrentiel tel que présenté à la figure 5.1. L'échelle de comparaison débute à l'intérieur de l'entreprise, soit par rapport à son historique (ou son référentiel) et culmine par une performance de calibre mondial de l'entreprise.

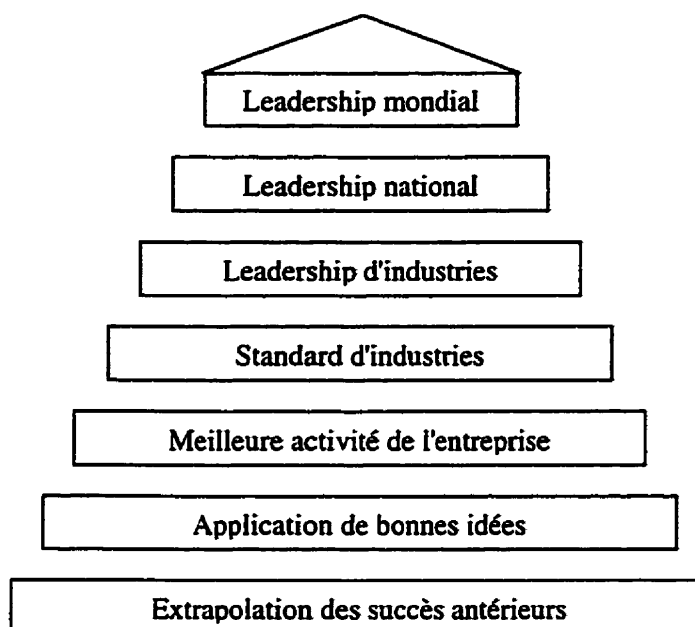


Figure 5.1 Niveaux d'étalonnage concurrentiel pour les processus et les mesures de performance définis par Bogan et English (1994)

Aussi, Bogan et English (1994) introduisent la notion de décision du moment propice à la réingénierie d'un procédé. Ils proposent l'utilisation des notions d'étalonnage concurrentiel pour l'évaluation de la dégradation d'un système par comparaison avec la performance d'un autre système, toujours selon le niveau d'études préconisé. Cette notion peut très bien être extrapolée pour les fins de notre recherche, soit l'évaluation de l'implantation dans le but de déterminer le moment idéal pour sa révision.

Selon l'expérience de l'entreprise dans le domaine de l'étalonnage concurrentiel et son niveau d'excellence, le type d'étalonnage concurrentiel en application est différent. Une étude interne est initiée pour une entreprise qui débute dans l'évaluation périodique de l'implantation à l'aide de la notion d'étalonnage concurrentiel. Aussi, ce type d'étude a des résultats beaucoup plus précis face aux problèmes potentiels reliés au système manufacturier. Les études compétitive et fonctionnelle sont applicables aux procédés opératoires et aux méthodes de gestion de diverses entreprises. Le degré de précision et de détail de l'analyse, est encore ici, très important. Une étude générique est initiée pour tenter de comprendre les causes et fondements du niveau d'excellence d'une entreprise particulière. Par la suite, ces stratégies gagnantes sont extrapolées pour le domaine de production de l'entreprise instigatrice de l'étude.

L'étalonnage concurrentiel peut donc être utilisé de façon complémentaire à l'analyse ponctuelle de l'implantation. Initialement, une évaluation est faite en fonction du référentiel et par la suite la performance de l'implantation peut être située par rapport à un niveau d'excellence particulier, que ce soit un étalonnage interne ou externe à l'entreprise.

5.4 Analyse d'un cas

L'objectif de l'analyse est l'évaluation des indicateurs proposés et la validation de la détection de changements relativement à la performance de l'implantation. Un cas tiré de la littérature relié à l'assemblage de balances, soit le cas HAR BAL de Mariotti (1985), est présenté. Différentes opérations de coupe, d'usinage et autres sont effectuées sur différents sous-produits. Par la suite, ceux-ci sont assemblés en plusieurs étapes pour la production finale de balances. Le cas HAR BAL comporte des renseignements sur l'implantation actuelle, les principaux sous-produits (soit un total de 20) et leur processus de transformation, les équipements de manutention et les relations interactives. Les données sont complétées par des scénarios de production, d'horaires de travail et autres. L'annexe 6 comporte un résumé de la description du cas et les ajouts considérés pour compléter les données.

Cette étude de cas comporte cinq scénarios de production et, selon trois objectifs d'étude, des paramètres (éléments-types et indicateurs de performance de l'implantation) sont sélectionnés. Un descriptif des résultats est présenté. Dans un contexte réel d'application de cette méthodologie, l'origine des variations de la valeurs des indicateurs est à déterminer. Cependant, dans le but d'étudier l'applicabilité de notre méthodologie, divers scénarios de variations de paramètres du système de production sont proposés. L'objectif poursuivi est donc **l'évaluation de la capacité de détection** de ces variations par les indicateurs élaborés, et ce en fonction des objectifs d'étude.

5.4.1 Description de l'étude

Les hypothèses des deux premières catégories de la méthodologie proposée sont résumées au tableau suivant. Le dernier thème - *Analyse* - est repris en détail dans les pages qui suivent.

Tableau 5.4 Catégories Étude initiale et Angle d'analyse pour le cas étudié

Étude initiale	
Dans un but de simplification, il est considéré que les données initiales représentent l'implantation référentielle.	
Angle d'analyse	
4°	Objectifs d'étude sélectionnés :
Obj1-	De façon globale, évaluation de la variation de la structure de produits et de la constance des différents processus opératoires;
Obj2-	Évaluation de la manutention vers l'assemblage final;
Obj3-	Évaluation des bris et pannes de certains équipements de production.
5°	Paramètres d'analyse en fonction de l'objectif visé : <i>voir le tableau 5.5</i>
6°	Dans notre étude, l'étape de collecte de données est théorique, et est donc omise. Les scénarios (Sc) établis pour l'évaluation de l'objectif et appliqués de façon séquentielle sont :

Tableau 5.4 Catégories Étude initiale et Angle d'analyse pour le cas étudié (suite)**6° Sc1 - Remplacement d'un procédé par un procédé amélioré :**

Le procédé de fabrication d'un produit intermédiaire (P10) de la structure de produits est modifié et la séquence résultante des opérations est :

B15 (-) - A12 (55) - A6 (60) - A4 (4) - A4 (2) - A3 (-)

Les temps unitaires d'opération, entre parenthèses, sont en secondes par pièce intrant. Ce nouveau procédé est défini comme étant le produit intermédiaire (P10a). Les autres produits ne sont pas influencés par cette modification.

Sc2 - Variation de la demande pour le produit au procédé modifié :

La demande de P10a pour la prochaine année est modifiée comparativement à l'année référentielle. Les cas étudiés sont de -20 %, +10 % et +20 % de variation de la demande. Ces variations n'affectent pas la production des autres produits. Le cas retenu pour les scénarios subséquents est une hausse de 10 %.

Sc3 - Achat d'une machine d'un type particulier :

Pour diminuer le taux d'utilisation des machines A3 - 57 ½ Toledo Press, une machine de même type est achetée et positionnée à la place de l'équipement B6.

Sc4 - Augmentation de pannes et d'entretien de certaines machines très utilisées :

Une machine A3 - 57 ½ Toledo Press, de l'îlot principal, est temporairement remise puisqu'elle nécessite des réparations majeures. Aussi, le taux de pannes des équipements A3 et A12 augmente respectivement de 12% et de 5%.

Sc5 - Production partielle en sous-traitance :

20 % de la production du produit P10a, soit un total de 18 unités de charge de manutention, est effectuée par un sous-traitant. Ce sous-produit arrive à l'entrepôt B15 et est directement transféré à l'un des postes A3.

Tableau 5.5 Objectifs d'étude et paramètres d'analyse associés

Paramètres	OBJECTIFS		
	OBJ1	OBJ2	OBJ3
Produits	P10, P12, P14, P19 et P20	P12, P19 et P20	P10, P12 et P14
Équipements de production	A3, A5, A12, B5, C6a, C6b, C6c, C6d et D1	A2 et B13	A3, A5, A12, B5 et D1
Système de manutention	<i>nil</i>	S1, S2, S3 et S4	<i>nil</i>
Gestion de production	<i>nil</i>	<i>nil</i>	entrepôts B3 et B15
Indicateurs ¹ sélectionnés	IND1, IND2, IND3 et IND5	IND1, IND3 et IND8	IND1, IND3 et IND9

- ¹ IND1 - Ratio de quantité à fabriquer IND5 - Ratio de distance
IND2 - Ratio de procédé de fabrication IND8 - Ratio d'engorgement
IND3 - Taux de fonctionnement IND9 - Ratio d'entreposage

Pour chacun des objectifs, le choix des paramètres d'analyse est basé sur les critères décrits dans les pages suivantes.

Objectif 1 - De façon globale, évaluation de la variation de la structure de produits et de la constance des différents processus opératoires

Les types de machine A5 et A12 sont utilisés pour la production d'un grand nombre de composants. Les types de machine A3, B5, C6a, C6b, C6c, C6d et D1 ont un taux d'utilisation référentiel supérieur à 0,85 - ce seuil critique établi de façon arbitraire (*voir le tableau A7.1 pour les valeurs référentielles*). L'objectif étant associé aux processus opératoires, le ratio de procédé (indicateur #2) se doit d'être évalué. Aussi, la combinaison du ratio de quantité à fabriquer (indicateur #1) et du ratio de distance (indicateur #5) indique l'influence qu'a la modification de la structure de produits sur l'implantation, par exemple dans le cas où la quantité et la distance augmentent. Les produits étudiés sont P10, P12, P14, P19 et P20. Les deux premiers ont des gammes de production complexes, le troisième a un ratio référentiel de la quantité à fabriquer

plus élevé que la valeur arbitraire (*voir le tableau A7.1 pour les valeurs référentielles*), et les deux derniers sont associés au produit final. Finalement, le taux de fonctionnement (indicateur #3) permet le suivi de l'utilisation des différents équipements de production.

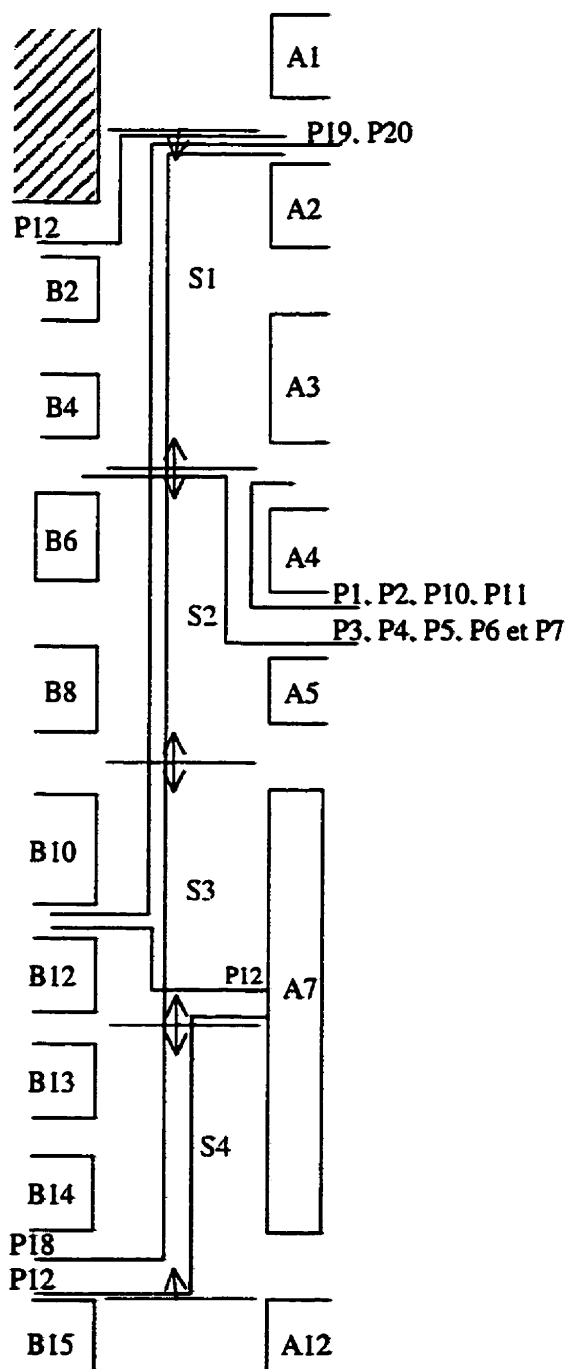


Figure 5.2 Graphique des segments d'allée étudiés (Si) pour l'objectif 2

Objectif 2 - Évaluation de la manutention vers l'assemblage final

Les taux de fonctionnement (indicateur #3) des types de machine A2 et B13 sont évalués puisqu'ils sont en amont de l'assemblage final. Le ratio de quantité à fabriquer (indicateur #1) des produits P19 et P20 permet de déterminer si une variation de la quantité a un effet négatif sur l'implantation. Le ratio d'engorgement (indicateur #8) se doit d'être évalué pour le couloir associé à l'assemblage final, qui est aussi, pour le système étudié, le couloir le plus utilisé. Ce couloir est divisé en quatre segments. La figure 5.2 présente la définition graphique de ces segments et les différents produits circulant sur ces segments. Basé sur l'étude de ces segments d'allée, le produit principal manutentionné sur ces segments, soit le produit P12, doit faire partie de l'évaluation périodique.

Objectif 3 - Évaluation des bris et pannes de certains équipements de production

Le ratio de quantité à fabriquer (indicateur #1) est évalué pour les produits P10, P12 et P14; les 2 premiers sont associés à la gamme de fabrication, et le dernier, au ratio de quantité à fabriquer du référentiel. Le taux de fonctionnement (indicateur #3) des équipements A3, B5 et D1 sont étudiés puisque leur taux d'utilisation du référentiel est supérieur à 0,85. Pour leur part, les équipements A5 et A12 sont utilisés par un grand nombre de types de produit. Les ratios d'entreposage (indicateur #9) pour B3 et B15 devraient être évalués en combinaison avec les indicateurs précédents. Cependant, le manque d'informations ne permet pas de faire le suivi de ces deux éléments.

Il est maintenant nécessaire d'identifier les bornes supérieures et inférieures des indicateurs de performance. Par définition, ces bornes doivent être personnalisées, c'est-à-dire établies en fonction de chaque élément-type. Par exemple, les bornes associées au taux de fonctionnement d'un centre d'usinage et d'une simple perceuse ne sont pas nécessairement équivalents, ne serait-ce que pour le coût de possession de tels équipements. Pour le cas à l'étude, les données sont simplifiées en considérant les mêmes valeurs de bornes par types

d'indicateur de performance. Ainsi, les bornes supérieures et inférieures des différents indicateurs sélectionnés sont établies comme suit :

Indicateur #1 : variation permise de $\pm 20 \%$ de la quantité à fabriquer

Indicateur #3 : valeurs admissibles du taux d'utilisation actuel incluses dans l'intervalle de 0,40 à 0,95

Indicateur #5 : valeurs admissibles inférieures ou égales à 0,10

Indicateur #8 : valeurs admissibles inférieures ou égales à 0,10

Tel que mentionné au chapitre précédent, le nombre de chiffres significatifs pour chacun des indicateurs est fonction des paramètres étudiés. Pour l'indicateur #1, la plus petite valeur parmi les ratios référentiels sélectionnés est associée au produit P10 pour lequel la variation est détectable au millième du ratio (produit P13 : 320/194 526). Ainsi, l'indicateur #1, le ratio de quantité à fabriquer, nécessite 4 chiffres significatifs, soit pour détecter la demie d'un millième. Pour l'indicateur #3, le taux de fonctionnement, 2 chiffres significatifs sont suffisants, soit pour détecter la demie d'un dixième d'une unité du taux. Pour l'indicateur #5, le ratio de distance, les distances minimale et maximale parcourues par un produit sont respectivement de 334 et de 2 038 pieds par unité. Ainsi, une variation d'un pour-cent (deux chiffres significatifs) est associée à un déplacement supplémentaire de trois à vingt pieds. Pour l'indicateur #8, le ratio d'engorgement, les densités référentielles minimale et maximale sont respectivement de 2 115 et de 12 696 unités de charge * pieds / jour (UC*pi/jr). Deux chiffres significatifs permettent la détection d'une variation de 21 à 126 UC*pi/jr. Pour chaque type d'indicateur utilisé, un exemple de calculs de bornes est présenté. Pour chacun des indicateurs, les valeurs référentielles sont calculées et les bornes établies à l'annexe 7.

Calcul de bornes pour IND1(P10) - Ratio de quantité à fabriquer :

quantité totale d'unités en circulation par jour (8 heures) = 194 526 unités / jour

quantité du produit P10 en circulation par jour (8 heures) = 320 unités / jour

ratio référentiel de quantité du produit P10 = 0,0017

$$\text{Borne inférieure : } \frac{320*0,8/(194\,526-320*0,2)}{0,0017} - 1 = -0,2256$$

$$\text{Borne supérieure : } \frac{320*1,2/(194\,526+320*0,2)}{0,0017} - 1 = +0,1608$$

Calcul de bornes pour IND3(A5) - Taux de fonctionnement :

$$\text{Taux référentiel de fonctionnement et accessoire} = 0,73$$

$$\text{Borne inférieure : } 0,40 - 0,73 = -0,33$$

$$\text{Borne supérieure : } 0,95 - 0,73 = +0,22$$

Calcul de bornes pour IND5(P10) - Ratio de distance :

$$\text{Borne inférieure : aucune, par définition}$$

$$\text{Borne supérieure : } 0,10$$

Calcul de bornes pour IND8(S1) - Ratio d'engorgement :

$$\text{Borne inférieure : aucune, par définition}$$




$$\text{Borne supérieure : } 0,10$$

5.4.2 Analyse des résultats

Le principe de détection des changements est validé à l'aide d'indicateurs élaborés au chapitre précédent. Les résultats sont présentés en fonction des objectifs définis dans la méthodologie d'analyse. Pour chacun des objectifs, une analyse par scénario est détaillée. Comme utilisés au chapitre précédent, les domaines de solutions possibles sont représentés graphiquement pour chacun des indicateurs évalués. L'axe des x est associé aux différents scénarios. Pour l'analyse en temps réel, cet axe serait associé aux différents moments

d'évaluation périodique des indicateurs de performance, soit un axe temporel. Dans un souci de clarté, tous les graphes sont présentés en deux dimensions. Cependant, le principe reste le même lorsqu'une troisième dimension est utilisée. Aussi, seuls les indicateurs comportant une variation non négligeable pour l'un ou l'autre des scénarios sont présentés dans les pages qui suivent. L'annexe 7 comporte les détails des calculs, des résultats et des graphiques des domaines de solutions associés pour les indicateurs de performance, et ce pour les différents scénarios de production.

Pour toutes les figures associées à l'analyse des résultats, la légende suivante est utilisée, sauf si autrement spécifiée.

 statu quo	 pertinence	 analyse
L.I. : Limite inférieure	L.S. : Limite supérieure	

Objectif 1- De façon globale, évaluation de la variation de la structure de produits et de la constance des différents processus opératoires

Les graphiques des figures 5.3 à 5.6 présentent les résultats sous forme de cartes de contrôle pour chaque type d'indicateur de performance. Les ratios de quantité à fabriquer (indicateur #1) des produits P12, P14, P19 et P20 sont nuls ou de variations négligeables pour tous les scénarios élaborés. Seules les bornes inférieures et supérieures sont différentes pour chacun. Les ratios de procédé (indicateur #2) des produits P12, P14, P19 et P20 restent nuls pour tous les scénarios. Tous les taux de fonctionnement (indicateur #3) des équipements B5, C6a, C6b, C6c, C6d, et D1 sont nuls. Finalement, les ratios de distance (indicateur #5) sont de valeurs nulles ou négligeables pour les produits P12, P14, P19 et P20. Tous ces cas ne sont donc pas représentés dans les figures suivantes. Malgré le fait que ces indicateurs ont des valeurs nulles ou de faibles variations, certains sont près de la limite supérieure de variation permise. Ce sous-ensemble inclut les taux de fonctionnement des types d'équipement B5, C6a, C6b, C6c, C6d et D1 (indicateur #3). Il est donc important d'analyser les conséquences de ces valeurs sur l'implantation et de corriger la situation, si nécessaire.

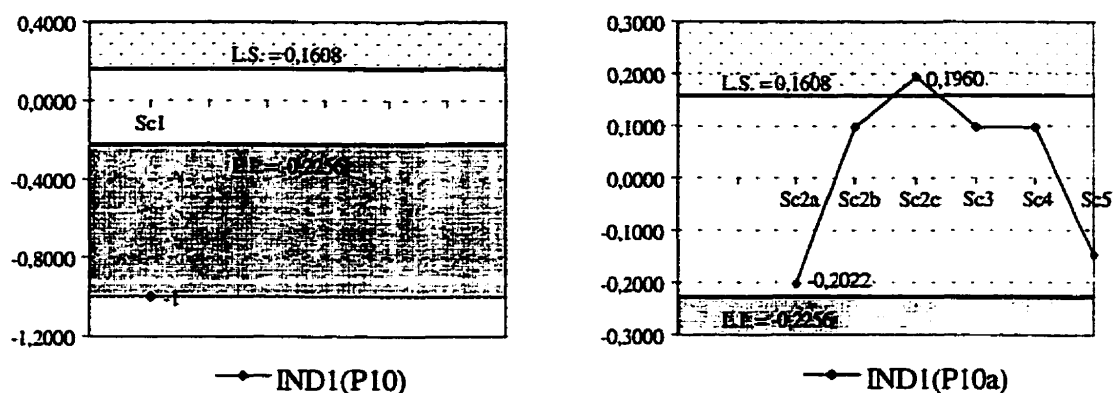


Figure 5.3 Objectif 1 - Ratios de quantité à fabriquer (IND1) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable

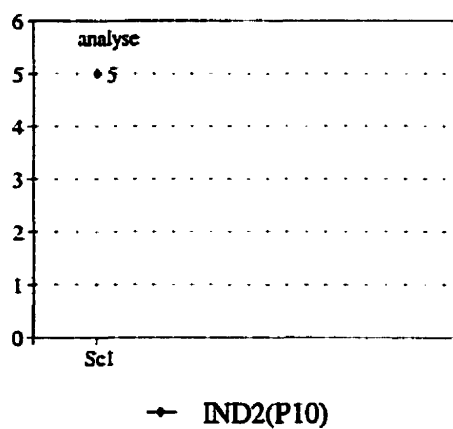


Figure 5.4 Objectif 1 - Ratios de procédé de fabrication (IND2) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable

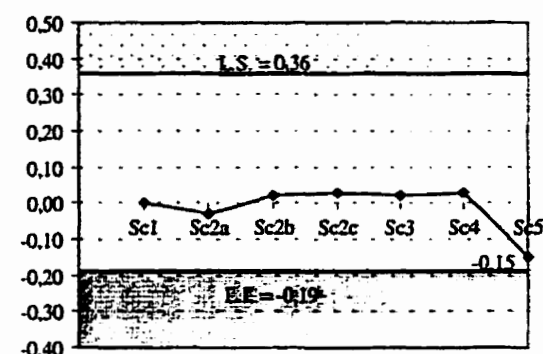
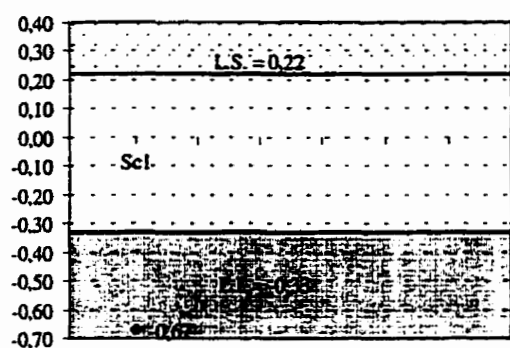
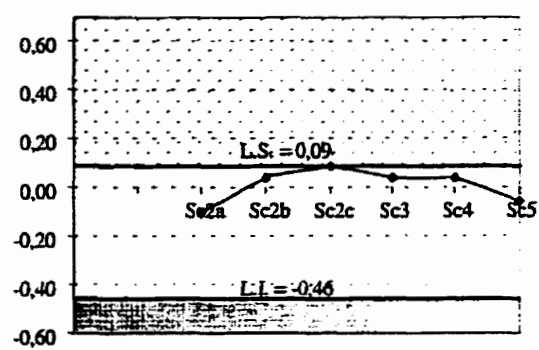
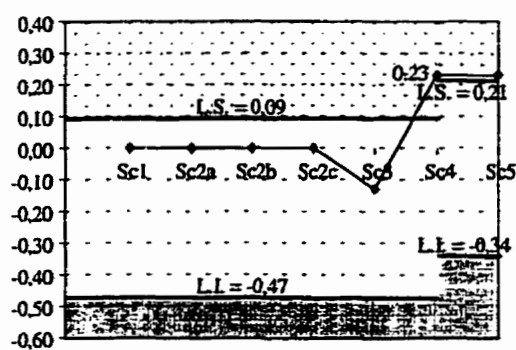


Figure 5.5 Objectif 1 - Taux de fonctionnement (IND3) pour les équipements ayant au moins une valeur non négligeable

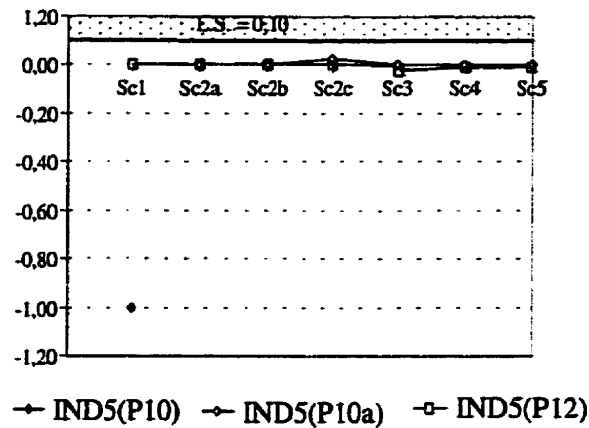


Figure 5.6 Objectif 1 - Ratios de distance (IND5) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable

Le premier scénario est défini par le remplacement d'un procédé par un procédé amélioré. Le ratio de procédé de fabrication (indicateur #2, figure 5.4) pointe un changement pour le procédé du produit P10. Ce changement comporte une baisse hors borne du taux de fonctionnement de l'équipement A5 (indicateur #3, figure 5.5) ainsi qu'une diminution du ratio de quantité à fabriquer (indicateur #1, figure 5.3) et du ratio de la distance à parcourir (indicateur #5, figure 5.6) pour ce procédé. Une valeur de -1 pour les deux derniers ratios indique que ce produit ne fait plus partie de la structure de produits lors de l'évaluation périodique. Une analyse doit être déclenchée dans le but de déterminer si d'autres types d'équipement sont affectés par ce changement. Basé sur le processus opératoire du procédé amélioré, le type d'équipement A4 est inclus dans notre procédure de suivi périodique de l'implantation. La proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement A4 ($T^*(A4)$) est maintenant de 0,86 et les bornes du taux de fonctionnement sont $[-0,46; +0,09]$ (figure 5.5). Aussi, il n'est plus pertinent de faire le suivi du type d'équipement A5 puisque que son taux de fonctionnement a une valeur hors borne de -0,67. Cette valeur signifie que l'atelier possède une capacité trop importante par rapport à la demande pour ce type d'équipement. Il est de mise d'analyser l'aménagement pour s'assurer que les équipements sous-utilisés ne monopolisent pas des localisations-clés. Finalement, le suivi est maintenant associé au produit P10a plutôt qu'au produit P10. La distance totale parcourue par une unité de produit P10a est de 516 pieds. Cette valeur est utilisée dans le calcul du ratio de distance (indicateur #5, figure 5.6). Pour ce scénario, le

sous-ensemble d'éléments-types sélectionnés permet donc la détection des changements relatifs à la structure de produits et aux processus opératoires.

Le deuxième scénario propose une variation de la demande pour le produit au procédé modifié, P10a. Pour une diminution de 20 % (Sc2a), le taux de fonctionnement de A4 (indicateur #3, figure 5.5), équipement associé au produit P10a, subit une baisse, mais avec un respect de sa borne inférieure. La valeur du ratio de quantité à fabriquer du produit P10a (indicateur #1, figure 5.3) est près de sa borne inférieure. Un suivi attentif de cet élément-type est suggéré dans le but de déterminer si la tendance se maintient ou si la variation est ponctuelle. Basé sur ces résultats, aucun changement associé à l'implantation, aux éléments-types ou aux indicateurs de performance n'est donc proposé. Pour une augmentation de 10 %, toutes les bornes sont respectées. Pour une hausse de 20 %, le taux de fonctionnement de A4 (indicateur #3, figure 5.5) est équivalent à la limite supérieure préétablie. Selon l'évaluation par l'ingénieur industriel de l'état, temporaire ou permanent, de la situation, une analyse des paramètres associés à cette variation doit être initiée. Par exemple, une analyse du produit P10a doit porter sur la nécessité de la mise à jour des bornes de l'indicateur du ratio de quantité à fabriquer. Les alternatives d'achat d'une nouvelle machine et sa localisation, ou de l'attribution de temps supplémentaire doivent être étudiées. Les effets sur la performance de l'implantation doivent être identifiés et corrigés, si nécessaire. Pour les autres indicateurs, les valeurs calculées sont négligeables ou nulles. Encore ici, la combinaison d'éléments-types détecte bien les changements apportés à la structure de produits.

Le troisième scénario, l'achat d'une machine de type A3, implique un statu quo de l'implantation puisque tous les indicateurs de performance de l'implantation évalués respectent leurs bornes. Étant donné l'ajout d'une machine, les valeurs référentielles doivent être mises à jour. Ainsi, la proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement A3 ($T^*(A3)$) devient 0,74 avec des bornes pour le taux de fonctionnement (indicateur #3, figure 5.5) de $[-0,34; +0,21]$. L'ajout d'une machine a pour conséquence une augmentation des bornes (déplacement vers le haut sur la carte de contrôle). Ceci signifie que la hausse de la capacité totale pour ce type d'équipement implique qu'il est permis d'utiliser plus d'heures de production avant d'atteindre la limite supérieure. Considérant une distribution uniforme des opérations sur les 7 machines de type A3, les distances totales parcourues par une unité de produit P10a et P12 sont maintenant respectivement de 524 pieds

et de 1 844 pieds, distances utilisées pour les ratios de distance (indicateur #5, figure 5.6). L'implantation étant de type par procédés et la nouvelle machine étant localisée près de l'îlot principal, l'ajout de cet équipement de production n'a pas d'effets importants sur la performance de l'implantation. Les indicateurs de performance détectent bien une variation, mais les valeurs restent dans les bornes préétablies.

Le quatrième scénario implique une augmentation de pannes et d'entretien des équipements A3 et A12. Une variation hors borne du taux de fonctionnement de A3 (indicateur #3, figure 5.5) est détectée. Le différentiel par rapport à la borne supérieure est de +0,02, soit près de 90 minutes de production par jour pour ce type d'équipement. Dans ce cas, une politique de temps supplémentaire peut être retenue pour satisfaire la demande. Il n'est pas recommandé de mettre à jour les proportions des temps de fonctionnement et accessoire des équipements A3 et A12 ($T'(A3)$ et $T'(A12)$). En effet, la variation est engendrée par un bris d'équipement, état temporaire, et par une hausse des pannes, cause devant être analysée et corrigée, si possible. La cause de variation des différents indicateurs n'est pas associée à la structure de produits ou aux processus opératoires. Cependant, les effets sur la performance de l'implantation sont importants puisque des équipements de production deviennent des goulots.

Pour le dernier scénario, celui-ci impliquant de la sous-traitance pour le produit P10a, les résultats comportent une baisse du ratio de quantité à fabriquer pour le produit P10a (indicateur #1, figure 5.3) et des taux de fonctionnement de A4 et de A12 (indicateur #3, figure 5.5). Toutes ces variations respectant les bornes préétablies, toujours à l'exception du taux de fonctionnement de A3, les mêmes conclusions que le scénario précédent s'appliquent. Un changement touchant la structure de produits influence la performance de l'implantation. Ce scénario démontre que les indicateurs proposés permettent la détection des conséquences relatifs à ce changement.

D'après ces scénarios, le sous-ensemble d'indicateurs de performance sélectionnés permet d'identifier des variations de la structure de produits et des processus opératoires. Tels que prévus, les résultats d'analyse des indicateurs sélectionnés entraînent les actions proposées au tableau 4.7 du chapitre précédent. Une étude en temps réel de la performance de l'implantation peut mener à une

analyse des résultats en fonction de tendances. Dans notre étude, cet angle n'est pas analysé plus en détails.

Objectif 2- Évaluation de la manutention vers l'assemblage final

La figure 5.7 présente la carte de contrôle pour les résultats des indicateurs de performance comportant des variances. Les ratios de quantité à fabriquer (indicateur #1) des produits P12, P19 et P20 sont nuls ou de variations négligeables pour tous les scénarios élaborés. Seules les bornes inférieures et supérieures sont différentes pour chacun. Les taux de fonctionnement (indicateur #3) des équipements A2 et B13 et D1 sont nuls. Finalement, le ratio d'engorgement du segment d'allée S1 (indicateur #8) est de valeurs nulles ou négligeables. Tous ces cas ne sont donc pas représentés dans la figure suivante.

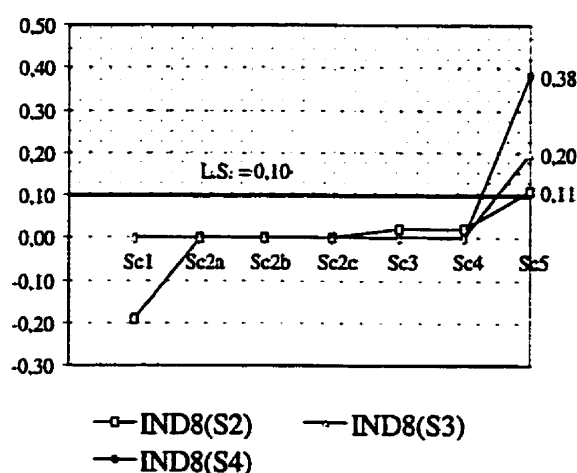


Figure 5.7 Objectif 2 - Ratios d'engorgement (IND8) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable

Pour le premier scénario, associé au procédé amélioré, tous les indicateurs de performance évalués respectent les bornes prédéfinies. Seul le ratio d'engorgement du segment d'allée S2 (indicateur #8, figure 5.7) présente une variation notable. Celle-ci est relative à la mise en production

du produit P10a. Une valeur négative représentant une diminution de la densité de circulation sur ce segment d'allée, les conséquences sur la performance de l'implantation sont plutôt bénéfiques. Ainsi, un statu quo de l'implantation est proposé. Étant donné une modification de la structure de produits, il est nécessaire de mettre à jour la valeur référentielle du segment d'allée S2 (densité^{*}(S2)). Le produit P10 étant éliminé de la structure de produits et le produit P10a ne circulant pas sur ce segment d'allée, le calcul est le suivant :

$$\begin{aligned}\text{densité}^*(S2) &= 12\,945 \text{ UC} * \text{pieds/jour} - 27 \text{ pieds} * 90 \text{ UC/jour} \\ &= 10\,515 \text{ UC} * \text{pieds/jour}\end{aligned}$$

Pour le deuxième scénario, associé à la variation de la demande, les indicateurs de performance sont de valeurs nulles ou négligeables. Un statu quo de l'implantation est proposé.

Pour le troisième scénario, relatif à l'ajout d'une machine, les indicateurs de performance sont de valeurs nulles ou négligeables. Une conséquence de l'ajout d'un équipement de production A3 est la nécessité d'une mise à jour des ratios d'engorgement des segments d'allée S1 et S2 (indicateur #5). Considérant l'hypothèse de répartition uniforme des tâches sur les équipements A3, les densités référentielles (densité^{*}(θ)) de S1 et S2, définies en unités de charge * pieds / jour (UC * pi / jour) sont maintenant respectivement de 6 802 et de 10 871. Le tableau 5.6 détaille les calculs associés.

Pour le quatrième scénario, associé à l'augmentation des taux de pannes et d'entretien des types d'équipement A3 et A12, les indicateurs de performance sont de valeurs nulles ou négligeables. Encore ici, ce scénario n'affectant pas de façon significative la manutention sur les segments d'allée étudiés, un statu quo de l'implantation est proposé.

Tableau 5.6 Calculs¹ des densités référentielles, pour les segments d'allée S1 et S2

	S1	S2
P1 et P2	0	27* (6+12) = 486
P3, P4, P5, P6 et P7	0	54* (12+10+2+2+11) = 1 998
P8 et P9	0	0
P10	0	0
P11	0	27* (4) *6/7+ 14 *(4)* 1/7 = 101
P12	14* (46)* 6/7+ 60 (46)* 1/7 = 946	14* (68) *1/7 *2+ 14 *(46)* 1/7 = 364
P13 @ P17	0	0
P18	60* (1) = 60	57* (1) = 57
P19 et P20	60* (26+20)+ 33* (26+20)+ 33* (26+20) = 5 796	57* (26+20)+ 57* (26+20)+ 57* (26+20) = 7 866
densité²(0)	6 802	10 872

¹ le premier nombre d'une multiplication : distance à parcourir en pieds

entre parenthèse : unités de charge à manutentionner / jour

² unités de charge * pieds / jour

Le cinquième scénario, associé à la sous-traitance du produit P10a, implique une importante variation hors bornes des ratios d'engorgement des segments d'allée S3 et S4 (indicateur #8, figure 5.7). La hausse des déplacements sur ces segments est associée au produit P10a' qui est manutentionné directement de B15 vers A3. Il est important d'étudier la circulation sur ces segments d'allée pour déterminer si la densité de circulation actuelle a des effets néfastes sur la production. Si tel est le cas, une révision de l'implantation s'impose. Aussi, si l'analyste considère que le contrat de sous-traitance est permanent, les densités référentielles des segments d'allées doivent être mises à jour pour cet objectif.

Cette étude ne détecte pas les variations hors bornes des taux de fonctionnement des types d'équipement A3, A4 et A5. Rappelons que l'objectif étudié est la détection de conséquences sur l'implantation des variations de la manutention vers l'assemblage final. Ainsi, les taux de fonctionnement des équipements de production ne sont pas à l'ordre du jour. Basé sur les résultats obtenus pour les différents scénarios, il est possible de remettre en question le choix de cet objectif. En effet, l'influence de la manutention vers l'assemblage final sur les indicateurs de performance sélectionnés est généralement négligeable. Cet objectif est un exemple où la définition de l'objectif à l'étude et la sélection des éléments-types et indicateurs associés ne permettent pas un suivi adéquat de la performance de l'implantation.

Objectif 3- Évaluation des bris et pannes de certains équipements de production

Les figures 5.8 et 5.9 présentent les cartes de contrôle pour chaque type d'indicateur de performance comportant des variations non négligeables. Les ratios de quantité à fabriquer (indicateur #1) des produits P12 et P14 sont nuls ou de variations négligeables pour tous les scénarios élaborés. Seules les bornes inférieures et supérieures sont différentes pour chacun. Les taux de fonctionnement (indicateur #3) des équipements B5 et D1 sont nuls mais près de la limite supérieure de variation permise. Il est donc important d'analyser les conséquences de ces valeurs sur l'implantation et de corriger la situation, si nécessaire. Tous ces cas ne sont pas représentés dans les figures suivantes.

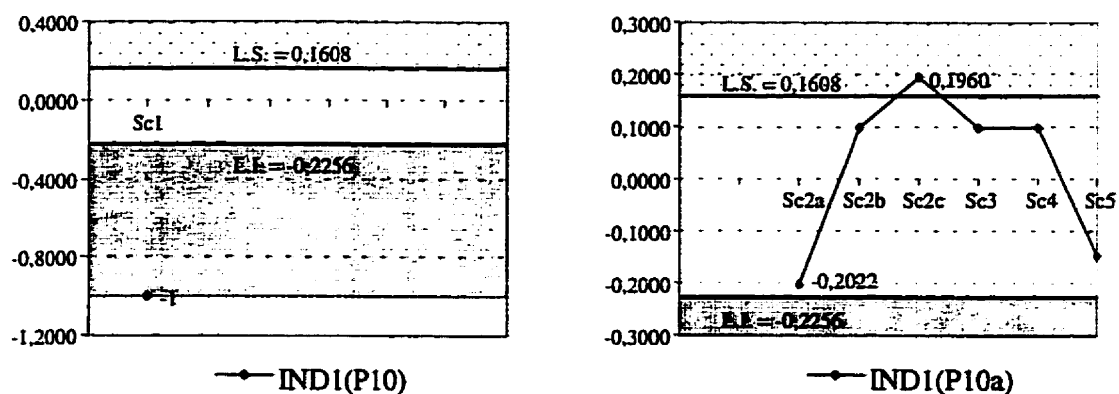


Figure 5.8 Objectif 3 - Ratios de quantité à fabriquer (IND1) pour les produits ayant au moins une valeur non négligeable

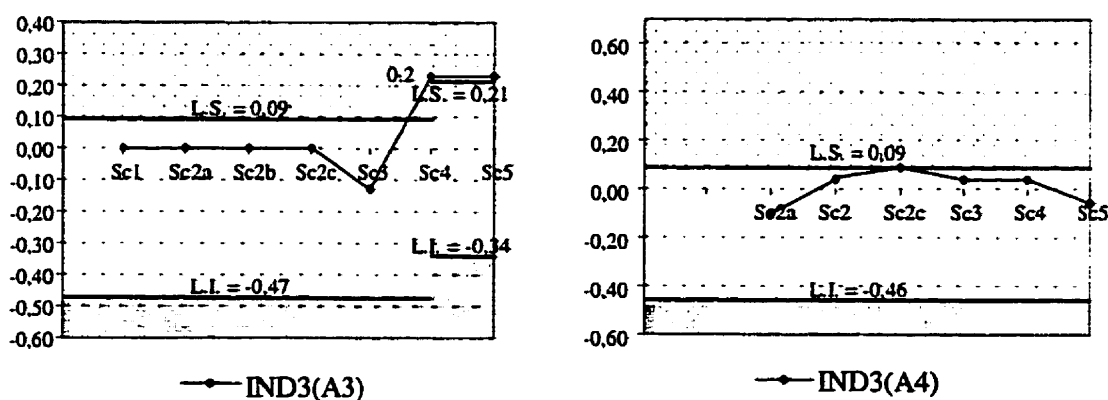


Figure 5.9 Objectif 3 - Taux de fonctionnement (IND3) pour les équipements ayant au moins une valeur non négligeable

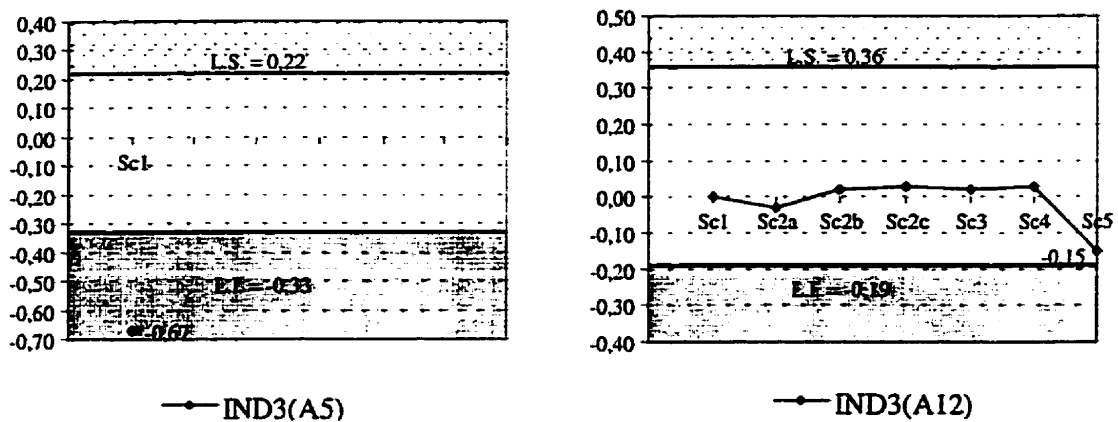


Figure 5.9 Objectif 3 - Taux de fonctionnement (IND3) pour les équipements ayant au moins une valeur non négligeable (suite)

Pour le premier scénario, associé à un procédé modifié, le taux de fonctionnement de A5 (indicateur #3, figure 5.9) est hors bornes. La pertinence de cet élément est remise en question. Après une analyse de causalité, le taux de fonctionnement de A5 est éliminé de notre évaluation périodique et remplacé par le type d'équipement A4. La proportion des temps de fonctionnement et accessoire ($T^*(A4)$) est maintenant égale à 0,86 avec des bornes du taux de fonctionnement de $[-0,46; +0,09]$. Finalement, le suivi est associé au produit P10a plutôt qu'au P10 avec une distance totale parcourue par une unité de produit P10a de 516 pieds.

Le second scénario est associé à une variation de la demande du produit P10a. Pour une diminution de 20 %, la valeur du ratio de quantité à fabriquer du produit P10a (indicateur #1, figure 5.8) est près de sa borne inférieure. Un suivi attentif de cet élément-type est suggéré dans le but de déterminer si la tendance se maintient ou si la variation est ponctuelle. Les valeurs de tous les autres indicateurs respectent les bornes préétablies. Pour l'augmentation de 10 %, tous les indicateurs calculés respectent les bornes préétablies. Dans le cas d'une hausse de 20 %, le taux de fonctionnement de A4 (indicateur #3, figure 5.9) est équivalent à la limite supérieure.

Une analyse portant sur les conséquences de cette hausse sur les performance de l'implantation peut être initiée. Par exemple, cette analyse peut inclure :

- l'étude de la nécessité de la mise à jour des bornes de l'indicateur du ratio de quantité à fabriquer du produit P10a (indicateur #1);
- l'étude de la sélection du type d'implantation pour le produit P10a (soit par procédés);
- l'étude des alternatives d'achat d'une nouvelle machine et sa localisation, ou de l'attribution de temps supplémentaire.

Les valeurs des autres indicateurs sont négligeables ou nulles. Encore ici, le sous-ensemble d'éléments-types et d'indicateurs de performance sélectionnés détecte bien les changements apportés à la structure de produits.

Les résultats du troisième scénario, relatif à l'achat d'une machine de type A3, comportent des valeurs d'indicateurs de performance de l'implantation respectant les bornes préétablies. Un statu quo de l'implantation est donc proposé. Cependant, l'ajout d'un équipement nécessite la mise à jour des valeurs référentielles. La proportion des temps de fonctionnement et accessoire de l'équipement A3 ($T^*(A3)$) est de 0,74 avec des bornes du taux de fonctionnement de $[-0,34; +0,21]$ (indicateur #3, figure 5.9). Ainsi, les indicateurs de performance détectent bien une variation, mais les valeurs restent dans les bornes préétablies.

Le quatrième scénario est associé à l'augmentation de pannes et d'entretien des équipements A3 et A12. Les résultats comportent des valeurs hors bornes du taux de fonctionnement de A3 (indicateur #3, figure 5.9). Une politique de temps supplémentaire peut être instaurée pour satisfaire la demande puisque le différentiel est de +0,02, soit près de 90 minutes de production par jour pour ce type d'équipement. Il n'est pas recommandé de mettre à jour les proportions des temps de fonctionnement et accessoire des équipements A3 et A12

($T^*(A3)$ et $T^*(A12)$). En effet, la variation est engendrée par un bris d'équipement, état temporaire, et par une hausse des pannes, cause devant être analysée et corrigée, si possible.

Les résultats du cinquième scénario, impliquant la sous-traitance du produit P10a, comportent une baisse du ratio de quantité à fabriquer pour le produit P10a (indicateur #1, figure 5.8) et des taux de fonctionnement de A4 et de A12 (indicateur #3, figure 5.9). Toutes ces variations respectant les bornes préétablies, toujours à l'exception du taux de fonctionnement de A3, les mêmes conclusions que le scénario précédent s'appliquent.

La combinaison de ces informations avec le ratio d'entreposage permettrait d'avoir une idée plus précise des effets sur l'implantation et sur la gestion des en-cours et des équipements. Par exemple, pour une même structure de produits, les délais de production peuvent entraîner une hausse ponctuelle du ratio d'entreposage. Ainsi, une analyse des causes peut mener à une révision de l'implantation ou à un changement quant à la politique de gestion d'entreposage ou de production.

5.5 Conclusion

L'établissement d'une méthodologie d'évaluation périodique de l'implantation nécessite, a priori, une simplification, si possible, du système manufacturier étudié. Le regroupement des produits (machines) en familles (cellules) permet cette simplification.. Des deux approches pour la mise en familles des produits, celle basée sur la gamme de production est préconisée, et ce en fonction de la liste ordonnée des opérations à être effectuées, et non des équipements utilisés. Étant donné la possibilité de différentes gammes viables pour la fabrication d'un même produit, il est important de souligner que la gamme sélectionnée doit être la gamme réelle de production. L'annexe 5 présente une discussion sur les différents modèles et techniques de regroupements élaborés au fil des années. La classification des modèles et des méthodes est relative aux regroupements simultanés ou consécutifs des produits et des machines. Aussi, le type de

regroupement non hiérarchique est favorisé. De façon complémentaire, la performance des regroupements doit faire l'objet d'une évaluation périodique.

La méthodologie proposée comporte trois catégories d'étapes menant à l'évaluation périodique de la performance de l'implantation : **Étude initiale**, **Angle d'analyse** et **Analyse**. La première catégorie a pour objectif la définition de l'implantation référentielle, soit l'implantation initiale considérée comme idéale pour la situation actuelle. La seconde catégorie identifie les objectifs visés par l'évaluation et les paramètres à considérer tels que les éléments-types, les indicateurs de performance et les bornes associées. La sélection de ces éléments-types est basée sur les résultats générés à l'étape préliminaire de réduction de la complexité du système à l'étude. La dernière catégorie comporte toutes les étapes d'exécution du suivi de la performance de l'implantation. En complément, la notion d'étalonnage concurrentiel définie par Karlöf et Östblom (1995) peut être appliquée pour comparer de la performance de l'implantation par rapport à un autre système, que ce soit de façon interne, externe, fonctionnelle, ou générique.

Le cas HAR BAL de Mariotti (1985), que nous avons enrichi, permet de présenter une application de notre méthodologie d'évaluation. L'objectif premier de cette analyse de cas est l'évaluation de la **capacité de détection** de la variation de paramètres du système de production à l'aide des indicateurs proposés. Cinq scénarios sont analysés, et ce pour trois différents objectifs. Les résultats obtenus pointent bien les modifications apportées au système de production, et ce toujours en relation avec l'objectif étudié. L'objectif #2 - Évaluation de la manutention vers l'assemblage final, démontre bien l'importance de la définition de l'objectif et des éléments-types sous observation. En effet, les 5 scénarios associés ne permettent pas d'identifier les problèmes relatifs à la sous- ou sur-utilisation des équipements de production. Cependant, ces résultats sont conséquents avec l'objectif étudié.

Comme prévu, les résultats obtenus pour un indicateur et l'origine des variations peuvent amplifier ou atténuer les résultats d'un autre indicateur. Le quatrième scénario appliqué au premier objectif est un exemple de l'interrelation de la valeur des indicateurs ainsi que des causes de variations. Les actions proposées sont aussi variées que le statu quo de l'implantation, l'ajout ou le retrait d'éléments-types à l'étude, la mise à jour de paramètres ou la révision de

l'implantation. Les résultats obtenus permettent d'envisager avec optimisme une future étape d'application en temps réel en industries.

Ce chapitre a permis de valider la méthodologie d'analyse de la performance de l'implantation que nous avons proposée pour la détermination du moment propice à sa révision. Un élément déterminant pour l'évaluation des performances de l'implantation est le réseau de couloirs utilisé. Une analyse de la combinaison du réseau de couloirs et du type d'usine préconisé est le thème du prochain chapitre.

CHAPITRE 6

RELATIONS ENTRE LES TYPES D'IMPLANTATION ET LES FORMES DE RÉSEAU DE COULOIRS

6.1 Introduction

La revue de littérature du chapitre deux permet de constater qu'une importante proportion des modèles et des méthodes mathématiques est axée sur l'amélioration d'une implantation. Dans un chapitre subséquent, un outil permettant la détermination du moment propice à la révision de l'implantation est défini. Cet outil, les indicateurs de performance, est une aide précieuse pour l'utilisation des différentes méthodes d'implantation. De façon complémentaire, le type d'implantation préconisé, que ce soit par processus opératoires, par produits ou autres, influence grandement le choix de l'un ou l'autre des modèles ou méthodes présentés dans la littérature.

Un trait d'union doit maintenant être tracé entre la sélection d'un type d'implantation et l'aménagement physique de l'implantation représenté par le réseau de couloirs. La majorité des auteurs présentant des algorithmes de résolution pour le problème d'implantation considèrent une implantation de type par blocs. Diverses hypothèses de travail sont énoncées dans la littérature, par exemple :

- 1) les sites sont de mêmes dimensions et définis a priori;
- 2) les allées sont prises en compte par l'utilisation d'un taux d'augmentation des dimensions des activités, hypothèse utilisée par Muther (1973), Harhalakis et al. (1996) et Tompkins et al. (1996);
- 3) le réseau de couloirs est défini a priori, par exemple la forme en épine dorsale ou en O.

La forme de réseau de couloirs la plus étudiée est l'épine dorsale avec la localisation des activités sur l'une des arêtes ou sur les deux. Les premiers auteurs à étudier ce cas particulier sont Adolphson et Hu (1973), Love et Wong (1976) et Beghin-Picavet et Hansen (1982). Plus récemment, des auteurs comme Houshyar (1991), Langevin et Riopel (1991), Langevin et al. (1994), Kouvelis et al. (1995), Ben-Arieh et Carley (1996), Delmaire et al. (1997) et Houshyar et White (1997) ont présenté diverses méthodes de résolution, exactes ou heuristiques. Les travaux de Kaku et Rachamadugu (1992), relatifs aux systèmes de production automatisés ("flexible manufacturing systems – FMS"), peuvent aussi être associés à ce cas particulier.

D'autres formes de réseau de couloirs ont aussi été étudiées. Par exemple, les travaux de Cheng et al. (1996) sont axés sur la forme en O avec un flux de circulation unidirectionnel, et ceux de Delmaire et al. (1997), sur les formes en O et en T.

D'autres auteurs combinent l'utilisation de divers algorithmes de construction d'implantation avec diverses formes de réseau de couloirs. Plus particulièrement, Abdou et Dutta (1990) proposent un système expert où le réseau de couloirs de circulation de l'implantation générale est prédéterminé. En effet, ils se basent sur le fait que pour tout type d'implantation, il existe un réseau de couloirs idéal. Le modèle d'Heragu et Kusiak (1990), relatif aux systèmes de production automatisés, nécessite aussi la sélection a priori de la forme d'implantation.

Les travaux de Tretheway et Foote (1994) et de Benson et Foote (1997) considèrent la complexité du réseau de couloirs en permettant la définition, toujours a priori, d'un réseau de couloirs sur lequel les activités sont localisées. Aussi, Benson et Foote (1997) soulignent la difficulté de déterminer de façon simultanée la localisation des postes d'entrée/sortie et la forme du réseau de couloirs. De plus, le modèle de Banerjee et al. (1997) tient compte d'une autre contrainte, soit la définition en continu des dimensions des activités. L'aire des activités est donc prédéfinie et le dimensionnement du périmètre est une variable du modèle.

Tous ces auteurs ont choisi de travailler avec l'une ou l'autre des formes d'implantation. Cependant, aucun d'entre eux ne discutent de ce choix en fonction du type d'implantation préconisé pour le système de production étudié. L'objectif de ce chapitre est donc la présentation

de résultats d'une recherche en entreprises visant à identifier les caractéristiques et tendances associées à la sélection, par les dirigeants d'entreprises, d'un réseau de couloirs particulier, et ce par types d'implantation. Les formes de réseau de couloirs retrouvées en entreprises sont : le complexe, le 8, le O, le H, le U, le T, le L, le I, la multiforme et l'hybride. La forme complexe est définie comme étant un réseau bouclé qui tend vers le quadrillé. Plusieurs trajets sont possibles pour le déplacement de matériaux d'un point à un autre. La multiforme est le regroupement de plusieurs formes avec une forme prédominante. La forme hybride est le regroupement de plusieurs formes, tronquées ou non, où aucune d'entre elles n'a préséance.

6.2 Profil des entreprises étudiées

Une enquête que nous avons menée en France et au Québec permet d'établir des liens directs entre les tailles d'entreprises, les types de production et les réseaux de couloirs de circulation des matériaux. Il est important de spécifier que la définition du réseau de couloirs d'une implantation fait référence aux **allées principales** utilisées pour la **manutention des matériaux**.

Notre analyse est basée sur des données tirées de la littérature et des rapports complétés dans le cadre de stages en entreprise, intégrés au programme scolaire de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) et de l'École Polytechnique de Montréal (Canada), et ce pour les années 1990 à 1998. Un grand total de 52 entreprises, 31 québécoises et 21 françaises, sont incluses dans notre enquête. De ce total, 7 entreprises ont des informations incomplètes associées au descriptif du processus de fabrication. Cependant, ces entreprises ne sont pas éliminées de l'enquête puisque les informations, même partielles, peuvent être utilisées dans notre analyse. Toutes les données de base, sans l'identification précise des entreprises pour cause de confidentialité, se retrouvent à l'annexe 8. L'annexe 9 comporte tous les tableaux croisés utilisés pour fin d'analyse.

Une première combinaison d'informations, soit la dimension physique des entreprises, le nombre d'employés et le chiffre d'affaires annuel, a pour objectif de catégoriser les entreprises selon leur taille : petite (PE), moyenne (ME), grande (GE) et très grande (TGE). Le

"Répertoire de produits disponibles au Québec", publié par le CRIQ (1991 @ 1998) est aussi une source d'informations quant au nombre d'employés. Deux entreprises étudiées n'ayant pas divulgué les informations, leurs caractéristiques sont estimées selon la définition du type d'entreprise et autres informations incluses dans les rapports ou recueillies lors des visites d'entreprises.

Lors de notre étude, un cas particulier s'est présenté : une entreprise (E30) comporte une combinaison de deux types d'implantation dans un même édifice, soit par processus opératoires pour la fabrication de matrices, et par produits pour le frittage des poudres. Ces deux activités sont indépendantes et peuvent très bien être localisées dans deux différents édifices. Cette entreprise est donc subdivisée en deux (E30a et E30b), et ce en fonction des différentes activités de production.

La figure 6.1 décrit l'échantillonnage des entreprises étudiées en mettant l'accent sur la combinaison d'informations permettant de déterminer la taille des entreprises. La dimension physique, le nombre d'employés, ou les deux, représentent une part importante, soit près de 94 %, des informations sur lesquelles il est possible de se baser pour établir la taille des entreprises. Aussi, seulement 26 % des entreprises ont divulgué leur chiffre d'affaires annuel. Cette caractéristique est donc prise en considération de façon complémentaire lors de l'établissement de la taille d'une entreprise. Une autre raison pour mettre en second plan le chiffre d'affaires est le biais qui affecte l'évaluation. L'importante variation de la complexité des processus opératoires et du prix de revient d'un produit (et par le fait même du coût des matières premières), d'une entreprise à l'autre, impliquent un biais sur la valeur du chiffre d'affaires annuel.

Seulement 34 % des entreprises n'ont mis à notre disposition qu'un seul type de caractéristique (dimension, nombre d'employés, chiffre d'affaires) permettant de déterminer leur taille. Ce pourcentage est considéré acceptable, considérant que la combinaison des diverses catégories augmente la précision de notre évaluation. Des exemples de correctifs apportés à une première évaluation de la taille d'une entreprise sont présentés au tableau 6.1.

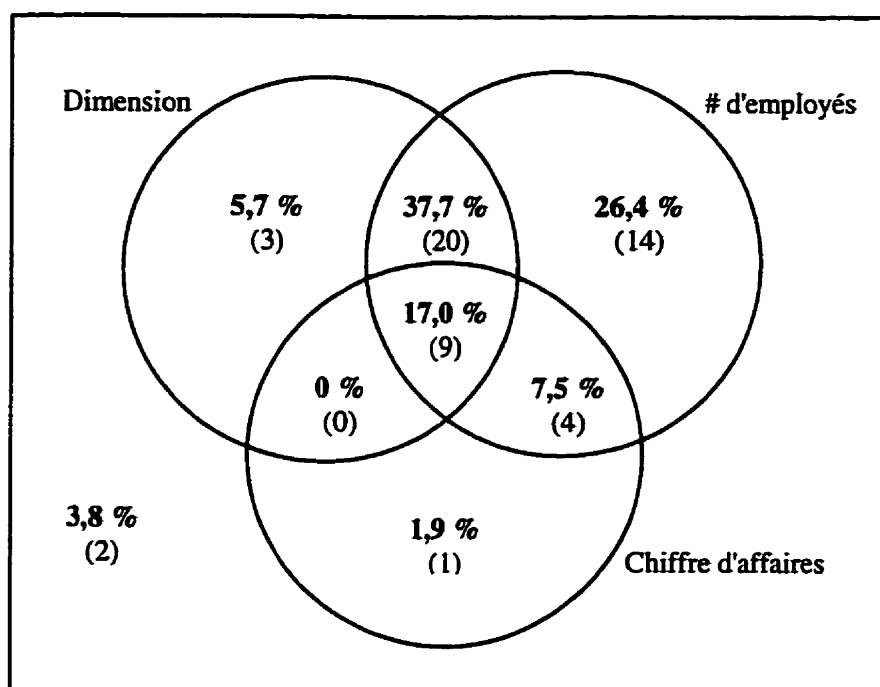


Figure 6.1 Proportion (et nombre) d'entreprises ayant divulgué les caractéristiques étudiées

Tableau 6.1 Exemples de correctif pour l'évaluation de la taille d'une entreprise

ENTREPRISE	TAILLE	ANALYSE	TAILLE CORRIGÉE
E06	TGE	<ul style="list-style-type: none"> • Dimension de 10 300 m²; • Moins de 300 employés; • Des équipements nécessitant beaucoup d'espace (bains de trempe). 	GE
P26	ME	<ul style="list-style-type: none"> • Dimension de 2 100 m²; • Moins de 40 employés; • 2.5M\$ de chiffre d'affaires annuel. 	PE
E15	ME	<ul style="list-style-type: none"> • Dimension de 2 500 m²; • Moins de 20 employés; • Des équipements nécessitant beaucoup d'espace (cuves de mélange). 	PE

La répartition des entreprises selon leur taille et les catégories d'informations associées sont résumées au tableau 6.2.

Tableau 6.2 Répartition des entreprises étudiées selon leur taille

TAILLE	ENTREPRISES		DIMENSION (m ²)	NOMBRE D'EMPLOYÉS	CHIFFRE D'AFFAIRES (M\$)
	NOMBRE	%			
PE	20	38 %	[0; 1 000[[0; 40[[0; 5[
ME	14	26 %	[1 000; 3 000[[40; 100[[5; 20[
GE	12	23 %	[3 000; 10 000[[100; 300[[20; 75[
TGE	7	13 %	[10 000; ...[[300; ...[[75; ...[

La figure 6.2 présente le graphe de la distribution du nombre de catégories par combinaison en fonction de la taille estimée des entreprises. L'accessibilité à l'information n'est pas l'apanage des petites (PE) ou des très grandes (TGE) entreprises. En effet, le pourcentage des entreprises ayant leur taille déterminée par deux ou trois catégories varie de 57,1 % à 66,7 %.

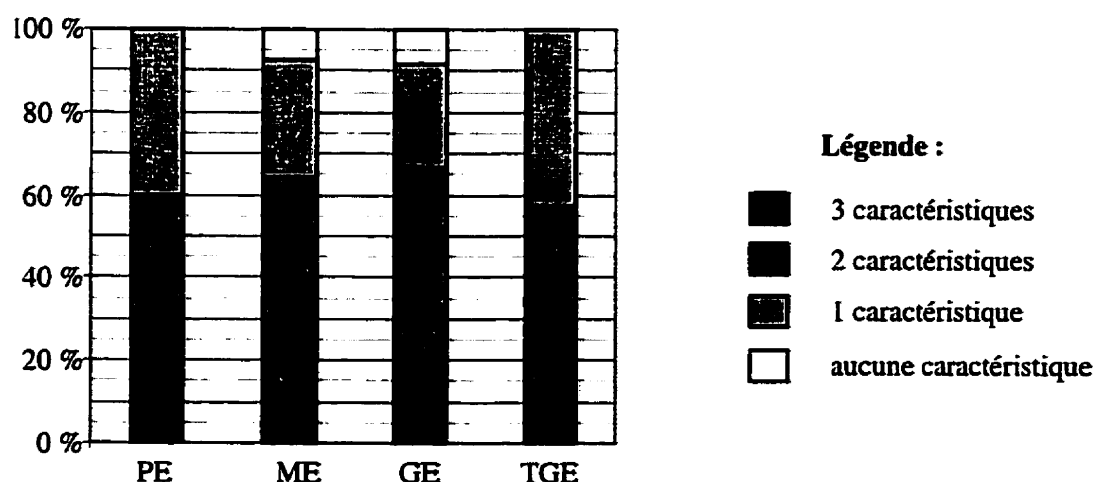


Figure 6.2 Distribution du nombre de caractéristiques connues en fonction de la taille des entreprises

Un second angle d'analyse des données est la distribution des entreprises étudiées selon leur classe d'industries. Le CTI (Classification-Type des Industries) établi par Statistiques Canada (1994) est utilisé pour nos fins d'analyse. Le tableau 6.3 présente cette distribution qui, de façon plus complète, est établie selon le type d'implantation préconisé. Un sous-ensemble de cinq entreprises possédant des implantations mixtes font partie de notre domaine d'étude. Considérant que toutes les étapes d'embouteillage utilisent, règle générale, une implantation de type par produits, ces étapes peuvent être regroupées sous le procédé "conditionnement". Donc, seule l'implantation de type par procédés est considérée. Le même raisonnement est appliqué dans le cas des étapes d'assemblage à la chaîne. Finalement, le cas particulier décrit dans les pages précédentes mène à la subdivision de la cinquième entreprise (E30) en deux parties, et ce selon les différentes activités.

Tableau 6.3 Distribution des entreprises selon le CTI et par types d'implantation

INDUSTRIES		TYPE D'IMPLANTATION			
CTI	DESCRIPTIF	PROC. OP.	PRODUITS	FAMILLES	CELLULES
10	Aliments	1	1		
11	Boissons	1	1		
16	Produits en matière plastique	3			
19	Produits textiles	1			1
24	Habillement	1			
25	Bois	1	1	1	
26	Meubles & articles d'ameublement	5	2		
28	Imprimerie, édition & industries connexes	2		1	
29	Fabrication de produits en métal	1	1		
31	Machinerie	1			2
32	Matériel de transport	2	1	1	
33	Produits électriques & électroniques	3	1		
35	Produits minéraux non métalliques	1		1	
37	Chimiques	2			
39	Autres industries manufacturières	3	1		

Après avoir complété la première analyse des données, l'analyse globale, une seconde analyse porte sur l'évaluation d'un secteur manufacturier associé à 20,8 % des entreprises échantillonnées, soit la fabrication de produits en métal (CTI-30).

6.3 Analyse des résultats d'enquête

6.3.1 Analyse globale

Depuis quelques années, la recherche dans le domaine d'implantation d'usine a permis la génération de nouveaux types d'implantation comme les implantations de type fractal (micro-usine) ou holographique qui s'ajoutent aux types classiques d'implantation, c'est-à-dire par processus opératoires, par produits et par familles de produits. Malgré cette diversification, une première lecture des résultats de l'enquête permet de conclure que les types classiques d'implantation sont ceux utilisés en industries. Un nouveau type d'implantation, l'implantation par cellules, est privilégié dans certaines entreprises. Il aurait été intéressant d'étudier plus en détails les raisons de ce choix en association avec le coût et le taux d'utilisation des équipements, les délais de fabrication et autres critères. Cet objectif ne faisant pas partie de notre enquête, les données correspondantes n'ont pas été recueillies. La constitution des différentes cellules est un autre élément qui nécessiterait une analyse plus approfondie. Il est à noter que certaines entreprises, comme E10 et E17, ont effectué un examen préliminaire de la circulation des produits avant d'optimiser l'implantation physique de la production. Pour les deux cas, les entreprises ont un flux global comportant peu de retours en arrière.

Avant de poursuivre l'analyse, rappelons que l'objectif principal de cette enquête est l'établissement d'un lien entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs. Dans un but de simplification, seules les formes **dominantes** d'implantation sont considérées dans notre analyse. Deux niveaux de décomposition de la distribution des entreprises sont utilisés. Le premier est associé à l'utilisation d'un réseau bouclé (réseau complexe symbolisé par #, en 8, en O et leurs dérivés) ou d'un réseau ouvert (réseau en H, en U, en T, en L, en I, et leurs dérivés). Le second niveau de décomposition est associé au niveau de complexité du réseau de couloirs, soit des réseaux élaborés comme le complexe et le 8, soit des réseaux simples comme le L et le I.

Comme défini précédemment, un réseau de couloirs est qualifié de multiforme (notation **m**) lorsqu'il est composé d'une forme dominante à laquelle s'ajoutent une ou plusieurs formes secondaires. Pour sa part, un réseau de couloirs hybride (notation **h**) peut être défini par plusieurs formes. La figure 6.3 présente des exemples de réseaux de couloirs et leur descriptif en terme de formes d'implantation. Par exemple, la notation **m8** signifie un réseau de couloirs multiforme ayant pour dominante la forme en 8. De même, **hT** décrit un réseau de couloirs pouvant être défini par une forme en T ou une autre forme similaire, par exemple le L ou le I. Ces implantations ne peuvent donc être qualifiées de pures.

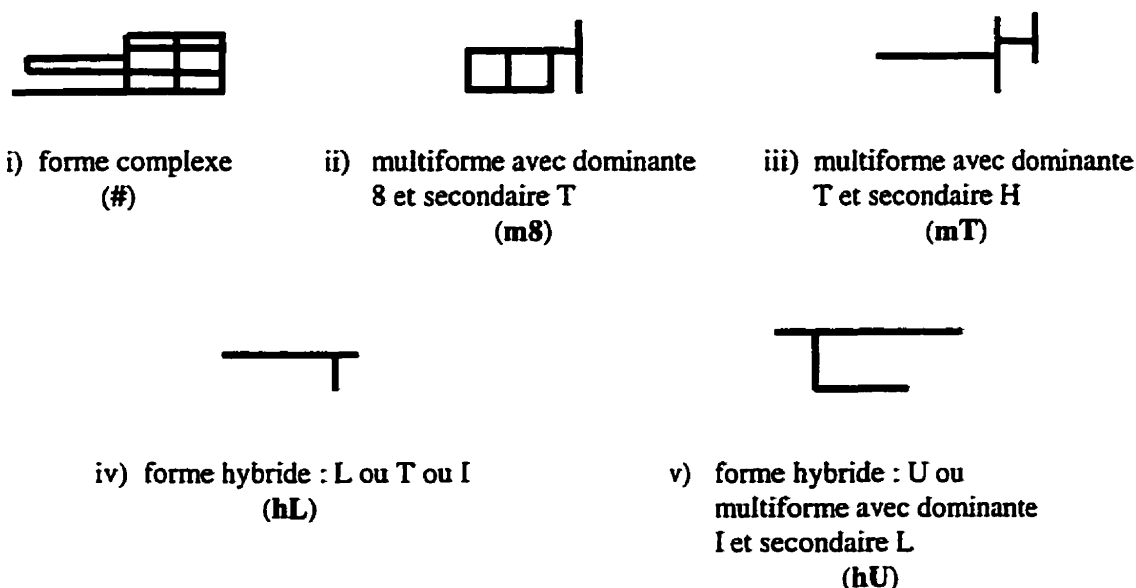


Figure 6.3 Exemples de descriptif de réseaux de couloirs en terme de formes d'implantation

La figure 6.4 présente de façon condensée un graphique des types d'implantation (par processus opératoires et autres) en fonction de leurs formes (**m8**, **mO**, et autres) et de leurs tailles : petite (**PE**), moyenne (**ME**), grande (**GE**) et très grande (**TGE**). Pour plus de clarté, chaque type d'implantation représenté sur le graphique est analysé indépendamment. Pour les implantations par cellules et par familles de produits, la taille de l'échantillon (respectivement de

4 et 3 entreprises) ne permet pas d'établir une tendance particulière. Cependant, dans le cas d'implantation par cellules, deux pôles sont identifiés: 1- la combinaison très grandes entreprises (TGE) et des réseaux bouclés élaborés, 2- la combinaison petites entreprises (PE) et des réseaux simples ouverts. Dans le cas d'implantation par familles de produits, il est intéressant de constater que les petites (PE) et moyennes (ME) entreprises de notre échantillon utilisent un réseau bouclé de niveau de complexité moyen.

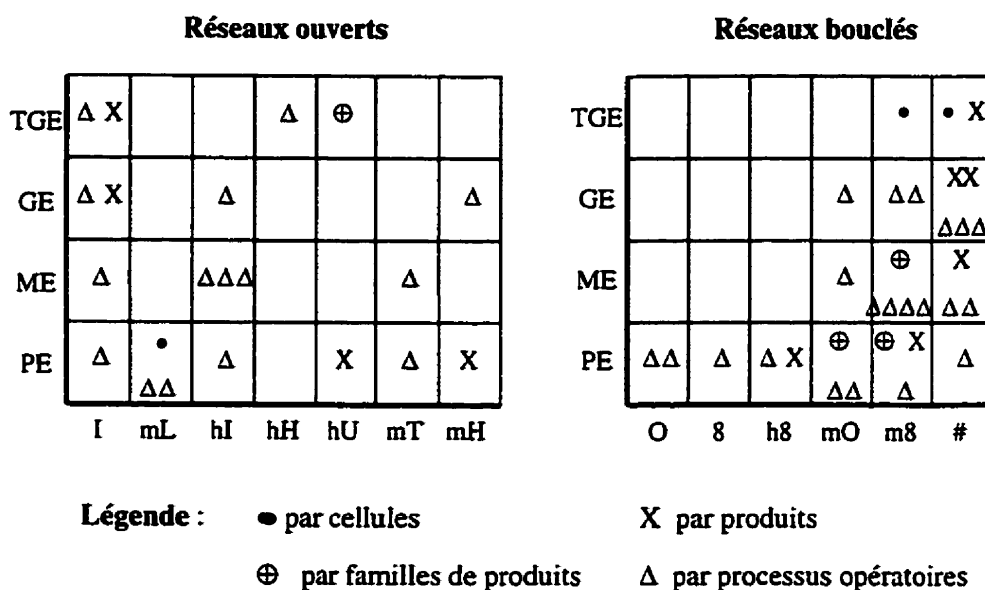


Figure 6.4 Graphique des types d'implantation en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises

La figure 6.5 met en évidence les informations du graphique précédent pour les implantations de types par produits seulement. Les grandes (GE) et très grandes (TGE) entreprises utilisent des réseaux situés aux deux extrémités de notre palette de niveaux de complexité. Pour ces deux tailles d'entreprises, certaines caractéristiques semblent déterminer le choix de l'un ou l'autre des extrémités :

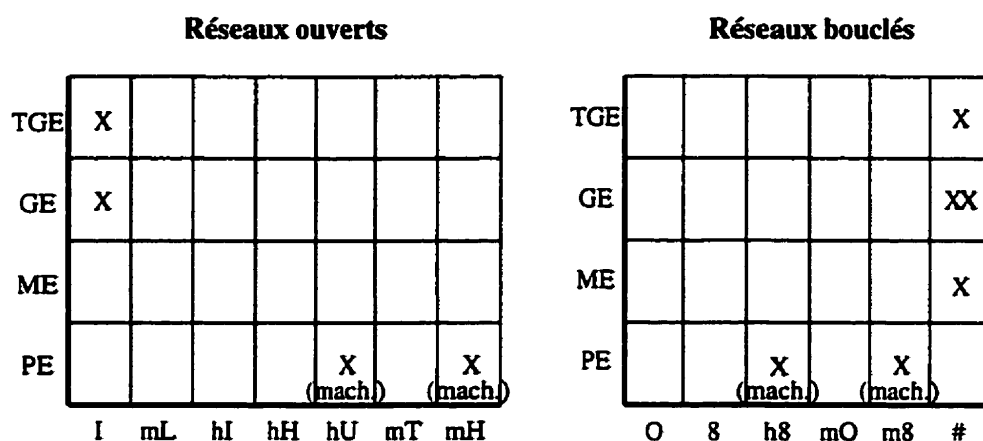
Réseaux ouverts simples

- structure de produits simple
- 1 département = 1 produit

Réseaux bouclés élaborés

- gammes complexes
- dimensions importantes des produits
- fabrication standard et personnalisée

Pour les petites entreprises (**PE**), la sélection d'un réseau particulier de couloirs est plus variable. Cependant, une tendance semble se dessiner. Une gamme complexe entraîne un réseau de couloirs plus élaboré. Une implantation dite par machines nécessite aussi un réseau de couloirs plus élaboré, par opposition à une implantation par départements.



Légende : X par produits

Figure 6.5 Graphique des implantations de type par produits en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises

Pour sa part, la figure 6.6 est associée aux implantations de types par processus opératoires seulement. Les grandes entreprises (**GE**) utilisent majoritairement (soit 67 % d'entre elles) des réseaux bouclés complexes. Pour deux entreprises exclues de ce sous-ensemble, une gamme simple avec peu d'utilisations à répétition des mêmes équipements de production peut être la caractéristique de sélection d'un réseau ouvert.

Près de 60 % des moyennes entreprises (ME) utilisent un réseau bouclé. 80 % des autres entreprises de même taille mettent en application un réseau ouvert simple de forme hI ou I. Ce choix est probablement fonction des caractéristiques des produits fabriqués, comme :

1) gammes comportant des étapes d'assemblage :

entreprises P19, P21 et P22

2) gammes simples :

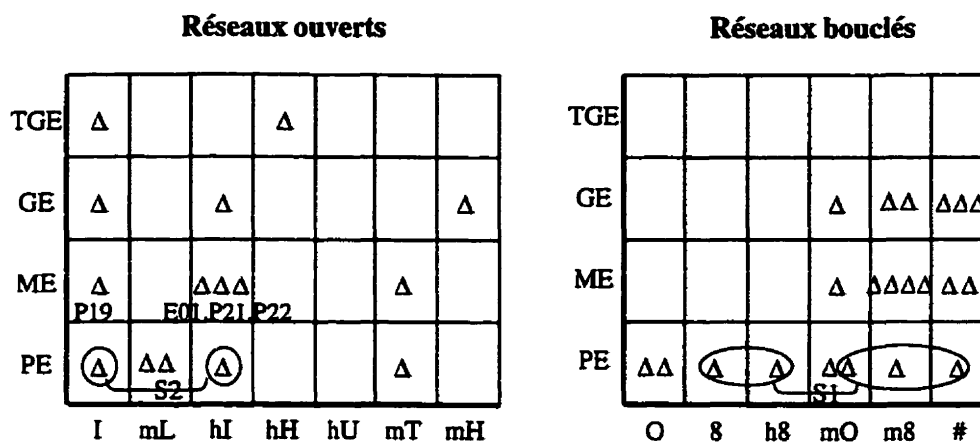
entreprises E01, P19 et P22

Le cas des petites entreprises (PE) est plus difficile à analyser. Un premier sous-ensemble d'entreprises (S1) est caractérisé par l'application de certains processus opératoires nécessitant un isolement. Les secteurs pharmaceutiques et cosmétiques font partie de ce sous-ensemble. Aussi, des processus de soudure, de fabrication de produits d'entretien et de lavage spécialisé de pièces se retrouvent dans ce sous-ensemble. Toutes ces entreprises mettent en application un réseau bouclé plus ou moins élaboré, selon la complexité des gammes et la compatibilité des différents processus opératoires. Une exception à cette généralisation est l'entreprise E15 du secteur diététique qui préconise un réseau de couloirs simple ouvert.

Deux autres entreprises offrent le service de fabrication personnalisé (S2). Ces entreprises utilisent un réseau bouclé pur en O permettant la flexibilité nécessaire. Pour ces deux entreprises, ce type d'implantation est associé au positionnement relatif des machines à l'intérieur du O, et certains départements comme le contrôle de qualité, sur l'enveloppe extérieure du O.

Comme pour les moyennes entreprises (ME), certaines petites entreprises (PE) comportant de l'assemblage ont opté pour un réseau ouvert simple.

Le critère d'isolement d'un processus opératoire (par exemple : contrôle de qualité, peinture, soudure, four, séchoir, chambre noire, entrepôts de matières premières) est traité de façon similaire pour la plupart des entreprises. 90 % des entreprises (9/10) qui possèdent un processus particulier à isoler utilisent un réseau bouclé plus ou moins élaboré avec ledit processus localisé soit sur les pourtours de l'implantation, soit sur une ramification extérieure au réseau bouclé.



Légende : Δ par processus opératoires

Figure 6.6 Graphique des implantation de type par processus opératoires
en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles
d'entreprises

6.3.2 Analyse du sous-ensemble d'entreprises de classe CTI-30

La fabrication des produits en métal (CTI-30) est associée à près de 21 % des entreprises échantillonnées. Il est donc intéressant d'analyser plus en détail ce secteur. La figure 6.7 présente les résultats de ce sous-ensemble d'entreprises. Près de 82 % des entreprises (9/11) de ce secteur ont opté pour une implantation de type par processus opératoires. De ces entreprises, 67 % utilisent un réseau bouclé de niveau plus ou moins complexe, selon la taille de l'entreprise. De plus, des étapes d'assemblage se retrouvent dans la gamme des deux entreprises utilisant un réseau ouvert en I. La sélection du type d'implantation par produits semble être basée sur les dimensions du produit ou sur le haut niveau de complexité de la gamme de fabrication.

Réseaux ouverts							Réseaux bouclés						
TGE	Δ X						TGE						
GE							GE				Δ	Δ	X
ME	Δ						ME						Δ
PE		Δ					PE	ΔΔ		Δ			
	I	mL	hI	hH	hU	mT	mH	O	8	h8	mO	m8	#

Légende : X par produits

Δ par processus opératoires

Figure 6.7 Graphique des types d'implantation en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises, pour les entreprises de classe CTI-30

6.4 Conclusion

Basée sur notre échantillon d'entreprises, la figure 6.8 présente un schéma établissant la relation entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs, et ce par tailles d'entreprises. Les résultats de ce premier essai démontrent qu'il est possible et approprié d'établir un trait d'union entre ces deux thèmes. Notre échantillon est constitué essentiellement d'entreprises utilisant les types d'implantation par processus opératoires et par produits. Pour les autres types d'implantation, soit par cellules et soit par familles de produits, une généralisation des tendances observées est déconseillée étant donné le faible nombre d'entreprises dans notre échantillon.

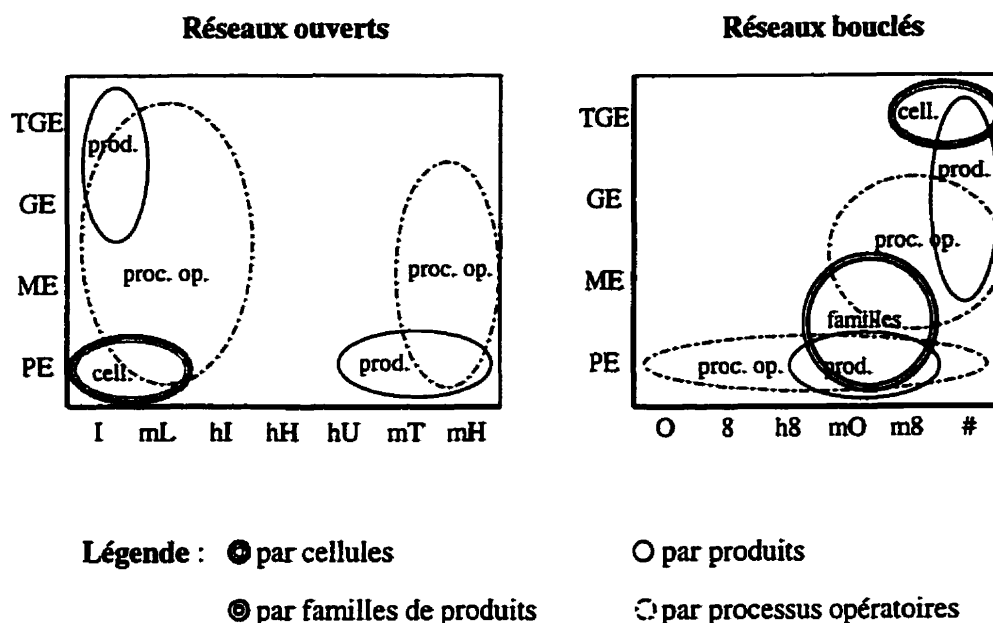


Figure 6.8 Graphique des types d'implantation en fonction des formes de réseau de couloirs et des tailles d'entreprises

Malgré le faible nombre d'entreprises associées aux types d'implantation par cellules et par familles de produits, quelques tendances peuvent être détectées. Pour le type par cellules, les réseaux de couloirs ouverts simples sont utilisés par les petites entreprises (PE) et les réseaux bouclés complexes, par les très grandes entreprises (TGE). Il serait intéressant de déterminer la relation entre la taille de la structure de produits et la forme de réseau utilisée. Pour le type par familles de produits, des réseaux bouclés élaborés sont l'apanage des petites et moyennes entreprises (PE et ME).

Notre échantillon inclut une importante proportion d'entreprises utilisant un type d'implantation par processus opératoires. Près de 60 % de ces entreprises utilisent un réseau bouclé. De celles-ci, la majorité est associée à un réseau complexe (mO, m8 et #). Ce sont les petites entreprises (PE) qui utilisent des formes de réseau bouclés simples (O, 8 et h8). Ces petites entreprises (PE) se spécialisent dans la fabrication personnalisée ou comportent des procédés nécessitant un

isolement. Pour les cas d'utilisation d'un réseau ouvert, les formes simples (I, mL et hI) ont la faveur, avec un taux d'utilisation de près de 80 %.

Les types d'implantation par produits sont associés à des réseaux de formes élaborées, qu'ils soient bouclés ou ouverts (hU, mH et m8). Les cas d'exception sont les systèmes de production comportant des structures de produits simples ou lorsqu'un département est associé à un produit particulier.

Les réseaux bouclés ont, règle générale, un niveau de complexité élevé. L'exception est le cas des petites entreprises utilisant un type d'implantation par processus opératoires. Pour ce cas particulier, des caractéristiques comme une production personnalisée ou standard, des opérations nécessitant un isolement, la complexité des gammes de fabrication, semblent influencer le choix de la forme de réseau de couloirs.

Une tendance est plus difficile à déterminer pour les réseaux ouverts. Les deux pôles du niveau de complexité sont employés. Encore ici, des gammes de fabrication simples sont associées à une forme de réseau de couloirs simple (I, mL et hI). De plus, le dédoublement de machines, la séquence des opérations, le nombre de visites à un équipement pour une gamme particulière et le type de fabrication comme l'assemblage entraînent aussi l'utilisation d'une forme de réseau simple.

Il est important de souligner que la réalité ne représente pas toujours ce que propose la littérature en terme d'implantation idéale. Lors de la sélection d'un type d'implantation, divers critères peuvent influencer le choix des gestionnaires, comme :

- 1) le coût des équipements de fabrication et leur taux d'utilisation,
- 2) la structure de produits,
- 3) le type de demande (que ce soit standard ou personnalisé),
- 4) les dimensions des produits et autres caractéristiques,
- 5) la complexité des gammes.

De plus, des gammes de production comportant un certain degré d'assemblage ou divers procédés nécessitant l'isolement ont des répercussions directes sur le choix de la forme du réseau de couloirs. Finalement, la croissance de l'entreprise, qui se manifeste par exemple par une augmentation des volumes de production, ou par une diversification de la structures de produits, peut avoir pour conséquence l'achat de nouveaux équipements, l'agrandissement du bâtiment actuel et même la relocalisation de l'entreprise. Ainsi, une analyse approfondie des caractéristiques de production permet de déterminer si le type d'implantation et la forme du réseau de couloirs sont toujours appropriés après un certain degré de croissance de l'entreprise.

Finalement, seulement cinq entreprises (10 % de l'échantillon) sont associées à une production hybride, c'est-à-dire une combinaison de deux types d'implantation dans un même édifice. Cette notion est très peu étudiée dans la littérature. Par exemple, Burgess et al. (1993) comparent, par simulation, les résultats d'une implantation par processus opératoires et les résultats d'une autre, hybride avec des cellules de fabrication et une section par processus opératoires. Plus récemment, une revue de terminologie de Facilities, Planning & Design Solutions (1998) définit qu'une implantation hybride fait partie de la catégorie implantations intermédiaires, mais sans plus de détail. Aussi, des modèles comme ceux de Li (1997) et de Grangeon et al. (1999) associent la notion d'implantation hybride au problème d'ordonnancement de la production. Ainsi, la sélection de la forme de réseau de couloirs pourrait être étudiée en association avec la notion d'implantation hybride.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

Les objectifs de ce travail de recherche sont associés à l'établissement du moment propice à la révision d'une implantation, et de liens entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs. Les pages suivantes comportent un retour sur notre recherche en fonction de ces objectifs ainsi qu'un descriptif des futures avenues de recherche.

7.1 Objectif 1 - Établissement d'une méthodologie d'évaluation de la performance d'une implantation

Considérant, dans un contexte d'implantation dynamique, des périodes de cycle de vie d'une implantation de durées variables, le premier objectif de notre travail de recherche est l'établissement d'une méthode simple ayant pour but d'évaluer l'état actuel d'une implantation. Cette évaluation temporelle permet de déterminer le moment où il est préférable de revoir l'implantation.

La méthodologie que nous avons élaborée se divise en trois grandes catégories : l'étude initiale, la définition de l'angle d'analyse et l'analyse proprement dite. Une nouvelle notion, les éléments-types, est utilisée en combinaison avec les indicateurs de performance proposés. Nous établissons quatre thèmes pour la définition des éléments-types et des indicateurs de performance, soit : les produits, les équipements de production, le système de manutention et la gestion de production.

Contrairement à des indicateurs de performance **de production** comme la productivité, le coût de revient ou la rentabilité, nos indicateurs sont dédiés à l'évaluation de la performance **de l'implantation**. Les équations des indicateurs sont des ratios et les évaluations temporelles sont présentées sous forme de cartes de contrôle. Parallèlement à l'analyse des résultats, il est nécessaire de remettre en question, de façon périodique, l'objectif visé puisque les résultats

peuvent s'avérer non significatifs pour cause de constance ou, à l'opposé, d'un trop haut degré de variabilité.

Les indicateurs élaborés font référence à une évaluation d'une implantation détaillée dans le secteur manufacturier. Par contre, il est possible de les modifier pour l'évaluation d'une implantation générale ou pour l'évaluation relative à une fonction particulière d'une entreprise.

Un important avantage de notre méthodologie est le suivi périodique de différents paramètres du système associé à une anticipation de la variation des données. Cette combinaison permet, de façon proactive, de modifier l'implantation tout en permettant une bonne période d'adaptation par rapport au nouvel aménagement. Ainsi, une modification de l'implantation peut être initiée avant même que le système ne soit trop engorgé.

La méthodologie proposée implique une connaissance approfondie du système étudié. Une hypothèse inhérente à notre méthodologie est l'accès aux données de l'entreprise. Avec l'ère informatique, les entreprises manufacturières ont accès à des banques d'informations relatives à leur production. Des caractéristiques associées à la manutention, aux espaces d'entreposage et aux politiques de gestion doivent aussi être compilées et périodiquement réévaluées pour une utilisation adéquate des indicateurs proposés. Une utilisation efficace de la méthode proposée passe nécessairement par l'informatisation de l'évaluation des indicateurs de performance.

Pour la validation de la méthodologie proposée, nous utilisons les données du cas HARBAL de Mariotti (1985) que nous avons enrichies. Trois objectifs sont à l'étude, et ce pour cinq scénarios séquentiels. Les résultats de cette étude démontrent bien que les indicateurs de performance détectent les changements apportés au système manufacturier. Cependant, il est crucial de bien définir l'objectif visé et de porter une attention particulière à la sélection des paramètres de l'étude. En effet, la capacité de détection des variations du système repose sur la définition de ces prémisses.

7.2 Objectif 2 - Recherche de liens conceptuels entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs de circulation des produits

Nous établissons, au chapitre 6, les liens conceptuels entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs. Les résultats obtenus sont un premier pas dans cette nouvelle direction de recherche. En effet, jusqu'à maintenant, aucun auteur ne présente de résultats d'observations permettant de définir cette relation. Notre analyse est basée sur des données tirées de la littérature et de rapports complétés dans le cadre de stages en entreprise, intégrés au programme scolaire de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (France) et de l'École Polytechnique de Montréal (Canada). Des 52 entreprises étudiées, les types d'implantation les plus utilisés sont par processus opératoires et par produits pour respectivement 36 et 10 entreprises. Ces types d'implantation sont donc analysés plus en détail. Les résultats de ce premier essai démontrent qu'il est possible et approprié d'établir un trait d'union entre les types d'implantation et les formes de réseau de couloirs.

Pour les implantations par processus opératoires et par produits, près de 60 % (respectivement 21/36 et 6/10) des entreprises utilisent un réseau bouclé. Pour ce cas particulier, un type complexe (mO, m8 et #) est utilisé pour toutes les entreprises de moyenne, grande et très grande taille. Une tendance est plus difficile à déterminer pour les réseaux ouverts. Les deux pôles du niveau de complexité sont employés. Des gammes de fabrication simples sont associées à une forme de réseau de couloirs simple (I, mL et hI).

Dans le cas des implantations par processus opératoires, plus de 60 % des petites entreprises (8/13) sont associées à un réseau bouclé. de ce sous-ensemble, la moitié (4/8) utilisent des réseaux bouclés simples (O, 8 et h8). Ces petites entreprises se spécialisent dans la fabrication personnalisée ou comportent des procédés nécessitant un isolement. Pour les cas d'utilisation d'un réseau ouvert, les formes simples (I, mL et hI) ont la faveur, avec un taux d'utilisation de 80 % (4/5).

Les types d'implantation par produits sont généralement associés à des réseaux de formes élaborées, qu'ils soient bouclés ou ouverts (hU, mH et m8). Les cas d'exception sont les systèmes

de production comportant des structures de produits simples ou lorsqu'un département est associé à un produit particulier. Pour les entreprises de grande et très grande taille, les deux extrêmes de la palette de formes de réseau de couloirs sont utilisés. En effet, l'utilisation de réseaux ouverts simples et de réseaux bouclés complexes est retrouvée en entreprises. Cette sélection semble être basée sur les caractéristiques des produits. Dans le cas des petites entreprises, la forme du réseau de couloirs préconisée est fonction des caractéristiques des produits ou des procédés. Cependant, nous remarquons qu'un réseau bouclé est utilisé en entreprises comportant de la fabrication sur mesure ou un procédé nécessitant l'isolement.

7.3 Avenues de recherche

Un premier point qui soulève notre intérêt est le peu d'homogénéité quant à l'évaluation des modèles et des méthodes élaborés. Plusieurs auteurs utilisent une version modifiée des problèmes-types de Nugent et al. (1968). D'autres auteurs préfèrent générer leur propres problèmes. Il serait intéressant de développer une série de problèmes-types de même complexité et définition de détails que le cas développé au chapitre 6, et surtout, point essentiel, associés à la réalité manufacturière. Les problèmes de Mariotti (1985) et de Meller et Bozer (1997) sont des exemples pouvant être utilisés. De façon complémentaire, l'impact de la variabilité des données sur la qualité de l'implantation peut être évalué, comme discuté par Hassan (1994). Cette banque de problèmes-types permettrait une meilleure comparaison des résultats générés par les divers modèles et techniques de résolution du problème d'implantation.

Une seconde lacune détectée est l'évaluation de la flexibilité ("flexibility") et de la souplesse ("agility") de la solution. Ces notions sont définies dans la revue *Facilities, Planning & Design Solutions* (1998) comme suit :

- flexibilité : capacité de gérer des variations de la structure de produits ou du volume de production. Le cheminement d'une pièce est donc fonction du type d'implantation utilisé et de la demande.
- souplesse : degré d'adaptation du système de production dans le cas d'un réaménagement. Par exemple, la standardisation des caractéristiques

des équipements et des services est l'une des étapes permettant une plus grande souplesse du système.

Tompkins et al. (1996) discutent aussi de la notion de flexibilité qu'ils représentent, dans le domaine d'implantation d'usine, par l'utilisation de modules. Ces modules peuvent prendre plusieurs formes comme l'implantation en épine dorsale ou en forme de T ou de X. Un autre critère de flexibilité de l'implantation est la notion de stabilité ("robustness"). Rosenblatt et Lee (1987) la définissent comme étant le nombre de fois qu'une solution est incluse dans un intervalle prédéterminé de variation de la solution optimale. Maniezzo et al. (1995) complètent la définition de flexibilité en spécifiant que la solution est viable, avec des modifications mineures si nécessaire, pour un nombre important de scénarios de production. Cependant, cette notion implique que l'implantation optimale est connue, ce qui n'est pas toujours le cas.

Ainsi, toutes ces notions pour l'évaluation d'une implantation nous amènent à demander si l'optimalité est essentielle ou si une bonne flexibilité et souplesse de l'implantation du système manufacturier étudié seraient acceptables. Une réflexion sur le sujet s'impose, en association avec une comparaison de résultats générés par divers modèles et techniques et des implantations viables sélectionnées.

Troisièmement, il serait intéressant de systématiser les étapes d'analyse de la méthodologie proposée en utilisant les notions de table décisionnelle, de système expert ou de théorie des ensembles flous. La pondération associée à une analyse multicritère étant difficile à déterminer, ces notions sont tout à fait appropriées pour la combinaison des résultats des indicateurs de performance.

Quatrièmement, la méthodologie proposée étant vérifiée avec succès par un cas théorique, la prochaine étape est l'analyse en temps réel de son applicabilité. Cette étape inclut une analyse de sensibilité des indicateurs par rapport aux changements du système manufacturier.

Cinquièmement, pour l'établissement de la relation TYPE-FORME, il serait intéressant de se concentrer sur un regroupement particulier d'entreprises, soit selon le CTI (Classification-Type des Industries). ou soit selon la taille : petite, moyenne, grande et très grande. Avec des résultats d'enquête comportant un degré de détails plus important, il serait possible de déterminer les raisons inhérentes aux choix du type d'implantation et de la forme de réseau de couloirs.

Sixièmement, l'enquête a permis d'identifier certaines entreprises utilisant le type d'implantation en cellules, type d'implantation très récent. Une seconde enquête plus détaillée nous permettrait de déterminer les raisons et critères utilisés pour cette sélection.

Finalement, notre enquête comporte cinq entreprises (10 % de l'échantillon) hybrides. Cette notion est très peu étudiée dans la littérature, sinon qu'associée au problème d'ordonnancement de la production. Cette situation, que nous supposons plus fréquente que les résultats de l'enquête le montrent, nous amène à réfléchir sur la définition d'une variante des modèles et des techniques permettant la division des données, pour un problème particulier, selon certains critères à déterminer dans un but d'application de plus d'un type d'implantation. Associée à la notion d'implantation hybride, la sélection de la forme de réseau de couloirs pourrait être étudiée de façon plus approfondie.

RÉFÉRENCES

——— (1998). New layout configurations for manufacturing facilities. Facilities, Planning & Design Solutions, pp. 1-6.

ABDOU, G., DUTTA, S. P. (1990). An integrated approach to facilities layout using expert systems. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 4, pp. 685-708.

ADOLPHSON, D., HU, T. C. (1973). Optimal linear ordering. SIAM Journal of Applied Mathematics, vol. 25, no. 3, pp. 403-423.

AFENTAKIS, P., MILLEN, R. A., SOLOMON, M. M. (1990). Dynamic layout strategies for flexible manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 2, pp. 311-323.

AKINC, U. (1985). Multi-activity facility design and location problems. Management Science, vol. 31, no. 3, pp. 275-283.

AKRIGHT, W. T., KROLL, D. E. (1998). Cell formation performance measures - determining when to change an existing layout. Computers & Industrial Engineering, vol. 32, no. 4, pp. 159-171.

ALDANONDO, M., BREUIL, D. (1993). Raw manufacturing data for hierarchical decision system : identification, structuration and potential use. Revue des systèmes de décision/Journal of Decisions Systems, vol. 2, no. 3, pp. 255-276.

AMERICAN PRODUCTIVITY & QUALITY CENTER (1993). The benchmarking management guide. Productivity Press, Cambridge, Massachusetts, 249 pages.

APPLE, J. M. (1963). Plant Layout and Materials Handling. The Ronald Press Company, 447 pages.

APPLE, J. M. (1977). Plant Layout and Materials Handling. John Wiley & Sons inc., New York, 3^e édition, 488 pages.

ASKIN, R. G., CIARALLO, F. W., LUNDGREN, N. H. (1999). An empirical evaluation of holonic and fractal layouts. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 5, pp. 961-978.

ATMANI, A., LASHKARI, R. S., CARON, R. J. (1995). A mathematical programming approach to joint cell formation and operation allocation in cellular manufacturing. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 1, pp. 1-15.

BADIRU, A. B., ARIF, A. (1996). FLEXPERT : facility layout expert system using fuzzy linguistic relationship codes. IIE Transactions, vol. 28, no. 4, pp. 295-308.

BANERJEE, P., MONTREUIL, B., MOODIE, C. L., KASHYAP, R. L. (1992). A modelling of interactive facilities layout designer reasoning using qualitative patterns. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 3, pp. 433-454.

BANERJEE, P., ZHOU, Y., MONTREUIL, B. (1997). Genetically assisted optimization of cell layout and material flow path skeleton. IIE Transactions, vol. 29, pp. 277-291.

BASSAL, F., DUGUAY, C., LAMARCHE, M., MARTIN, J. (1982). Modèle d'autodiagnostic de la productivité de l'entreprise. Rapport technique #EP82-R-36, École Polytechnique de Montréal.

BAZARAA, M. S. (1975). Computerized layout design : a branch and bound approach. AIIE Transactions, vol. 7, no. 4, pp. 432-438.

BEGHIN-PICAVET, M., HANSEN, P. (1982). Deux problèmes d'affectation non linéaires. Operations Research, vol. 16, no. 3, pp. 263-276.

BEN-ARIEH, D., CARLEY, E. D. (1996). Qualitative knowledge-based modelling of manufacturing systems. IIE Transactions, vol. 28, no. 9, pp. 761-772.

BENSON, B., FOOTE, B. L. (1997). DoorFAST : a constructive procedure to optimally layout a facility including aisles and door locations based on an aisle flow distance metric. International Journal of Production Research, vol. 35, no. 7, pp. 1825-1842.

BOGAN, C. E., ENGLISH, M. J. (1994). Benchmarking for best practices : Winning through innovative adaptation. McGraw-Hill inc., New York, 312 pages.

BOSWELL, S. G. (1992). TESSA - a new greedy heuristic for facilities layout planning. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 8, pp. 1957-1968.

BOZER, Y. A., MELLER, R. D., ERLEBACHER, S. J. (1991). An improvement-type layout algorithm for multiple floors facilities. Rapport technique #91-11, Université de Michigan, 33 pages.

BUFFA, E. S., ARMOUR, G. C., VOLLMANN, T. E. (1964). Allocating facilities with CRAFT. Harvard Business Review. vol. 42, pp. 136-157.

BUREAU INTERNATIONAL DU TRAVAIL (1985). Chapitre 19 - Fixation de normes de temps pour le travail avec des machines. Introduction à l'étude du travail, Genève, 2^e édition, 468 pages.

BURGESS, A. G., MORGAN, I., VOLLMANN, T. E. (1993). Cellular manufacturing : its impact on the total factory. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 9, pp. 2059-2077.

BUTLER, T. W., KARWAN, K. R., SWEIGART, J. R., REEVES, G. R. (1992). An integrative model-based approach to hospital layout. IIE Transactions, vol. 24, no. 2, pp. 144-152.

CAMBRON, K. E., EVANS, G. W. (1991). Layout design using the analytic hierarchy process. Computers & Industrial Engineering, vol. 20, no. 2, pp. 211-229.

CHANDRASEKHARAN, M. P., RAJAGOPALAN, R. (1986). An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing. International Journal of Production Research, vol. 24, no. 2, pp. 451-464.

- CHEN, C.-W., SHA, D. Y. (1999). A design approach for the multi-objective facility layout problem. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 5, pp. 1175-1196.
- CHENG, R., GEN, M., TOSAWA, T. (1996). Genetic algorithms for designing loop layout manufacturing systems. Computers & Industrial Engineering, vol. 31, no. 3-4, pp. 587-591.
- CHHAJED, D., MONTREUIL, B., LOWE, T. J. (1992). Flow network design for manufacturing systems layout. European Journal of Operational Research, vol. 57, no. 2, pp. 145-161.
- CHIANG, W.-C., KOUVELIS, P. (1996). An improved tabu search heuristic for solving facility layout design problems. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 9, pp. 2565-2585.
- CHIANG, W.-C., CHIANG, C. (1998). Intelligent local search strategies for solving facility layout problems with the quadratic assignment problem formulation. European Journal of Operational Research, vol. 106, no. 2-3, pp. 457-488.
- CHITTRATANAWAT, S., NOBLE, J. S. (1999). An integrated approach for facility layout, P/D location and material handling system design. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 3, pp. 683-706.
- CHRISTOFIDES, N., BENAVENT, E. (1989). An exact algorithm for the quadratic assignment problem on a tree. Operations Research, pp. 760-768.
- CO, H. C., ARAAR, A. (1988). Configuring cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 9, pp. 1511-1522.
- CO, H., WU, A., REISMAN, A. (1989). A throughput-maximizing facility planning and layout model. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 1, pp. 1-12.
- CRIQ. (1991 @ 1998). Répertoire des produits disponibles au Québec.

DAS, S. K. (1993). A facility layout method for flexible manufacturing system. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 2, pp. 279-297.

DELMAIRE, H., LANGEVIN, A., RIOPEL, D. (1995a). Evolution systems and the quadratic assignment problem. Document de travail #G95-24, Les cahiers du GÉRAD, 20 pages.

DELMAIRE, H., LANGEVIN, A., RIOPEL, D. (1995b). Le problème de design d'usine : une revue. Document de travail #G95-09, Les cahiers du GÉRAD, 52 pages.

DELMAIRE, H., LANGEVIN, A., RIOPEL, D. (1997). Skeleton-based facility layout design using genetic algorithms. Annals of Operations Research, vol. 69, pp. 85-104.

DREZNER, Z. (1987). A heuristic procedure for the layout of a large number of facilities. Management Science, vol. 33, no. 7, pp. 907-915.

DUTTA, K. N., SAHU, S. (1982). A multigoal heuristic for facilities design problems : MUGHAL. International Journal of Production Research, vol. 20, no. 2, pp. 147-154.

DWEIRI, F., MEIER, F. A. (1996). Application of fuzzy decision-making in facilities layout planning. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 11, pp. 3207-3225.

EL-RAYAH, T. E., HOLLIER, R. H. (1970), "A review of plant layout design techniques. International Journal of Production Research, vol. 8, no. 3, pp. 263-279.

FARRINGTON, P. A., NAZEMETZ, J. W. (1998). Evaluation of the performance domain of cellular and functional layouts. Computers & Industrial Engineering, vol. 34, no. 1, pp. 91-101.

FENG, E., WANG, X., WANG, X., TENG, H. (1999). An algorithm of global optimization for solving layout problems. European Journal of Operational Research, vol. 114, no. 2, pp. 430-436.

FORTENBERRY, J. C., COX, J. F. (1985). Multiple criteria approach to the facilities layout problem. International Journal of Production Research, vol. 23, no. 4, pp. 773-782.

FOULDS, L. R. (1983). Techniques for facilities layout : deciding which pairs of activities should be adjacent. Management Science, vol. 29, no. 12, pp. 1414-1426.

FOULDS, L. R., GIBBONS, P. B., GIFFIN, J. W. (1985a). Facilities layout adjacency determination : an experimental comparison of three graph theoretic heuristics. Operations Research, vol. 33, no. 5, pp. 1091-1106.

FOULDS, L. R., GIFFIN, J. W. (1985b). A graph-theoretic heuristic for minimizing total transport cost in facilities layout. International Journal of Production Research, vol. 23, no. 6, pp. 1247-1257.

FRANCIS, R. L., MCGINNIS JR, L. F., WHITE, J. A. (1992). Facility layout and location : an analytical approach. Prentice Hall, New Jersey, 589 pages.

GALBRAITH, L., MILLER, W. (1990). A multifactor approach to selecting computer generated electronics assembly facilities layouts. Computers & Industrial Engineering, vol. 18, no. 1, pp. 1-11.

GAVETT, J. G., PLYTER, N. V. (1965). The optimal assignment of facilities to locations by branch and bound. Pp. 210-232.

GELDERS, L., MANNAERTS, P., MAES, J. (1994). Manufacturing strategy, performance indicators and improvement programs. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 4, pp. 797-805.

GIFFIN, J. W., FOULDS, L. R. (1987). Facilities layout generalized model solved n-boundary shortest path heuristics. European Journal of Operational Research, vol. 28, pp. 382-391.

GLOVER, F. (1989). Tabu search part I. ORSA Journal on Computing, vol. 1, no. 3, pp. 190-206.

GOETSCHALCKX, M. (1992). An interactive layout heuristic based on hexagonal adjacency graphs. European Journal of Operational Research, vol. 63, pp. 304-321.

GOLANY, B., ROSENBLATT, M. J. (1989). A heuristic algorithm for the quadratic assignment formulation to the plant layout problem. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 2, pp. 293-308.

GOLDSCHMIDT, O., TAKVORIAN, A., YU, G. (1996). On finding a biconnected spanning planar subgraph with applications to the facilities layout problem. European Journal of Operational Research, vol. 94, no. 1, pp. 97-105.

GRANGEON, N., TANGUY, A., TCHERNEV, N. (1999). Generic simulation model for hybrid flow-shop. Computers & Industrial Engineering, vol. 37, no. 1-2, pp. 207-210.

GROBELNY, J. (1987). On one possible fuzzy approach to facilities layout problems. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 8, pp. 1123-1141.

GROBELNY, J. (1988). The linguistic pattern method for workstation layout analysis. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 11, pp. 1779-1798.

GUPTA, T., SEIFODDINI, H. (1990). Production data based on similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of a cellular manufacturing system. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 7, pp. 1247-1269.

HAHN, P., GRANT, T., (1998). A branch and bound algorithm for the quadratic assignment problem based on the Hungarian method. European Journal of Operational Research, vol. 108, no. 3, pp. 629-640.

HAMAMOTO, S., YIH, Y., SALVENDY, G. (1999). Development and validation of genetic algorithm-based facility layout - a case study in the pharmaceutical industry . International Journal of Production Research, vol. 37, no. 4, pp. 749-768.

HANSEN, P. (1986). The steepest ascent, mildest descent heuristic for combinatorial programming. Congrès sur les méthodes numériques en Optimisation Combinatoire, Capri, Italie.

HARHALAKIS, G., NAGI, R., PROTH, J. M. (1990). An efficient heuristic in manufacturing cell formation - for group technology applications. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 1, pp. 185-198.

HARHALAKIS, G., LU, T., MINIS, I., NAGI, R. (1996). A practical method for design of hybrid-type production facilities. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 4, pp. 897-918.

HARMONOSKY, C. M., TOTHERO, G. K. (1992). A multi-factor plant layout methodology. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 8, pp. 1773-1789.

HASSAN, M. M. D., HOGG, G. L. (1989). On converting a dual graph into a block layout. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 7, pp. 1149-1160.

HASSAN, M. M. D., HOGG, G. L., SMITH, D. R. (1986). SHAPE : a construction algorithm for area placement evaluation. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 5, pp. 1283-1295.

HASSAN, M. M. D., HOGG, G. L. (1991). On constructing a block layout by graph theory. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 6, pp. 1263-1278.

HASSAN, M. M. D. (1992). Some observations on converting a dual graph into a block layout. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 10, pp. 2477-2482.

HASSAN, M. M. D. (1994). Machine layout problem in modern manufacturing facilities. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 11, pp. 2559-2584.

HERAGU, S. S., KUSIAK, A. (1986). A construction algorithm for the facility layout problem. Document de travail.

HERAGU, S. S., KUSIAK, A. (1990). Machine Layout : An optimization and knowledge-based approach. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 4, pp. 615-635.

HERAGU, S. S., KUSIAK, A. (1991). Efficient models for the facility layout problem. European Journal of Operational Research, vol. 53, pp. 1-13.

HERRMANN, J. W., IOANNOU, G., MINIS, I., NAGI, R., PROTH, J.-M. (1995). Design of material flow networks in manufacturing facilities. Journal of Manufacturing Systems, vol. 14, no. 4, pp. 277-289.

HILLIER, F. S. (1963). Quantitative tools for plant layout analysis. Journal of Industrial Engineering, vol. 14, no. 1, pp. 33-40.

HO, Y. C., LEE, C., MOODIE, C. L. (1993). Two sequence-pattern, matching-based, flow analysis methods for multi-flowlines layout design. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 7, pp. 1557-1578.

HOLLAND, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems. Université de Michigan.

HOUSHYAR, A., MCGINNIS, L. F. (1990). A heuristic for assigning facilities to locations to minimize WIP travel distance in a linear facility. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 8, pp. 1485-1498.

HOUSHYAR, A. (1991). Computer aided facility layout : an interactive multi-goal approach. Computers & Industrial Engineering, vol. 20, no. 2, pp. 177-186.

HOUSHYAR, A., WHITE, B. (1997). Comparison of solution procedures to the facility location problem. Computers & Industrial Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 77-87.

IMMER, J. R. (1953). Material Handling. McGraw-Hill Book Company inc., 591 pages.

IRVINE, S. A., RINSMA-MERCHERT, I. (1997). A new approach to the block layout problem. International Journal of Production Research, vol. 35, no. 8, pp. 2359-2376.

ISLIER, A. A. (1998). A genetic algorithm for multiple criteria facility layout design. International Journal of Production Research, vol. 36, no. 6, pp. 1549-1569.

JABOT, R. (1977). Implantation et Manutentions dans les Ateliers. Édition Hommes et Techniques, Suresnes, 268 pages.

JACOBS, F. R. (1987). A layout planning system with multiple criteria and a variable domain representation. Management Science, vol. 33, no. 8, pp. 1020-1034.

JAJODIA, S., MINIS, I., HARHALAKIS, G., PROTH, J.-M. (1992). CLASS : Computerized Layout Solutions using Simulated annealing. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 1, pp. 95-108.

JOHNSON, R. V. (1982). SPACECRAFT for multi-floor layout planning. Management Science, vol. 28, no. 4, pp. 407-417.

KAKU, B. K., THOMPSON, G. L., BAYBARS, I. (1988). A heuristic method for the multi-story layout problem. European Journal of Operational Research, vol. 37, pp. 384-397.

KAKU, B. K., RACHAMADUGU, R. (1992). Layout design for flexible manufacturing systems. European Journal of Operational Research, vol. 57, pp. 224-230.

KARLÖF, B., ÖSTBLOM, S. (1995). Le benchmarking : un indicateur d'excellence en matière de qualité et de productivité. Collection Organisation Industrielle, Masson, Paris, 161 pages.

KETCHAM, M. G. (1992). A branch and bound approach to facility design for continuous flow manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 3, pp. 573-597.

KHALIL, T. M. (1973). Facilities Relative Allocation Technique (FRAT). International Journal of Production Research, vol. 11, no. 2, pp. 183-194.

KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., VECCHI, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. Management Science, vol. 29, no. 5, pp. 671-680.

KOCCHAR, J. S., HERAGU, S. S. (1998). MULTI-HOPE : a tool for multiple floor layouts problems. International Journal of Production Research, vol. 36, no. 12, pp. 3421-3435.

KOCCHAR, J. S., HERAGU, S. S. (1999). Facility layout design in changing environment. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 11, pp. 2429-2446.

KONZ, S. (1985). Facility Design. John Wiley & Sons inc., 368 pages.

KOUVELIS, P., KIRAN, A. S. (1991). Single and multiple period layout models for automated manufacturing systems. European Journal of Operational Research, vol. 52, pp. 300-314.

KOUVELIS, P., CHIANG, W. C. (1992). A simulated annealing procedure for single row layout problems in flexible manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 4, pp. 717-732.

KOUVELIS, P., KURAWARWALA, A. A., GUTIÉRREZ, G. J. (1992). Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. European Journal of Operational Research, vol. 63, pp. 287-303.

KOUVELIS, P., CHIANG, W. C., YU, G. (1995). Optimal algorithms for row layout problems in automated manufacturing systems. IIE Transactions, vol. 27, pp. 99-104.

KUMAR, C. S., CHANDRASEKHARAN, M. P. (1990). Group efficacy : a quantitative criterion for goodness of block diagonal forms of binary matrices in group technology. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 2, pp. 233-243.

KUMARA, S. R. T., KASHYAP, R. L., MOODIE, C. L. (1988). Application of expert systems and pattern recognition methodologies to facilities layout planning. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 5, pp. 905-930.

KUSIAK, A., HERAGU, S. S. (1987). The facility layout problem. European Journal of Operational Research, vol. 29, pp. 229-251.

KUSIAK, A., CHO, M. (1992). Similarity coefficient algorithms for solving the group technology problem. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 11, pp. 2633-2646.

LANGEVIN, A., RIOPEL, D. (1991). Design d'implantation générale à épine dorsale, 3e Congrès de génie industriel, Le génie industriel: facteur d'intégration et d'efficacité des entreprises. Tome 2, Tours, pp. 861-870.

LANGEVIN, A., MONTREUIL, B., RIOPEL, D. (1994). Spine layout design. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 2, pp. 429-442.

LECOUFLE, J. C. (1994). Facteurs de la disponibilité des équipements. Travail et Méthodes, vol. 510, pp. 46-50.

LEVARY, R. R., KALCHIK, S. (1985). Facilities layout - a survey of solution procedures. Computers & Industrial Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 141-148.

LI, S. (1997). A hybrid two-stage flowshop with part family, batch production, major and minor set-ups. European Journal of Operational Research, vol. 102, pp. 142-156.

LIN, L. C., SHARP, G. P. (1999a). Quantitative and qualitative indices for the plant layout evaluation problem. European Journal of Operational Research, vol. 116, pp. 100-117.

LIN, L. C., SHARP, G. P. (1999b). Application of the integrated framework for the plant layout evaluation problem. European Journal of Operational Research, vol. 116, pp. 118-138.

LOVE, R. F., WONG, J. Y. (1976). On solving a one-dimensional space allocation problem with integer programming. INFOR, vol. 14, no. 2, pp. 139-143.

LOVE, R. F., DOWLING, P. D. (1985). Optimal weighted lp norm parameters for facilities layout distance characterizations. Management Science, vol. 31, no. 2, pp. 200-206.

MALAKOOTI, B., D'SOUZA, G. I. (1987). Multiple objective programming for the quadratic assignment problem. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 2, pp. 285-300.

MALAKOOTI, B. (1989). Multiple objective facility layout : a heuristic to generate efficient alternatives. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 7, pp. 1225-1238.

MALAKOOTI, B., TSURUSHIMA, A. (1989). An expert system using priorities for solving multiple-criteria facility layout problems. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 5, pp. 793-808.

MANIEZZO, V., DORIGO, M., COLONI, A. (1995). Algodesk : an experimental comparison of eight evolutionary heuristics applied to the quadratic assignment problem. European Journal of Operational Research, vol. 8, no. 1, pp. 188-204.

MANS, B., MAUTOR, T., ROUCAIROL, C. (1995). A parallel depth first search branch and bound algorithm for the quadratic assignment problem. European Journal of Operational Research, vol. 81, no. 3, pp. 617-628.

MARCOTTE, S., MONTREUIL, B. (1995). Design of holographic layout for agile flow shops. Congrès International de génie industriel de Montréal : La productivité dans un monde sans frontières, Actes de congrès, pp. 929-938.

MARIOTTI, J. J. (1985). HAR BAL company-re layout to reduce handling cost. Material Handling Institute Edition, 23 pages.

MATSUZAKI, K., IROHARA, T., YOSHIMOTO, K. (1999). Heuristic algorithm to solve the multi-floor layout problem with the consideration of elevator utilization. Computers & Industrial Engineering, vol. 36, no. 2, pp. 487-502.

McCORMICK, W. T. Jr., SCHWEITZER, P. J., WHITE, T. W. (1972). Problem decomposition and data reorganization by clustering techniques. Operations Research, vol. 20, pp. 993-1009.

MELLER, R. D., BOZER, Y. A. (1996). A new simulated annealing algorithm for the facility layout problem. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 6, pp. 1675-1692.

MELLER, R. D. (1997). The multi-bay manufacturing facility layout problem. International Journal of Production Research, vol. 35, no. 5, pp. 1229-1237.

MELLER, R. D., BOZER, Y. A. (1997). Alternative approaches to solve multi-floor facility layout problems. Journal of Manufacturing Systems, vol. 16, no. 3, pp. 192-203.

MICHALEWICZ, Z. (1992). Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer-Verlag.

MONTREUIL, B., RATLIFF, H. D., GOETSCHALCKX, M. (1987). Matching based interactive facility layout. IIE Transactions, vol. 19, no. 3, pp. 271-279.

MONTREUIL, B., RATLIFF, H. D. (1988). Optimizing the location of input/output stations within facilities layout. Engineering Costs and Production Economics, vol. 14, pp. 177-187.

MONTREUIL, B., VENKATADRI, U. (1988). From gross to net layouts : an efficient design model. Document de travail #88-56, Université Laval, 28 pages.

MONTREUIL, B., RATLIFF, H. D. (1989). Utilizing cut trees as design skeletons for facility layout. IIE Transactions, vol. 21, no. 2, pp. 136-143.

MONTREUIL, B., VENKATADRI, U., RATLIFF, H. D. (1989). Generating a layout from a design skeleton. Document de travail #89-01, Université Laval.

MONTREUIL, B. (1991). A modelling framework for integrating layout design and flow network design. Progress in Material Handling and Logistics, John A. White & Ira W. Pence, Volume 2, Springer-Verlag, 580 pages.

MONTREUIL, B., VENKATADRI, U. (1991). Strategic interpolative design of dynamic manufacturing systems layouts. Management Science, vol. 37, no. 6, pp. 682-694.

MONTREUIL, B., LAFORGE, A. (1992). Dynamic layout design given a scenario tree of probable futures. European Journal of Operational Research, vol. 63, pp. 271-286.

MONTREUIL, B., VENKATADRI, U., RARDIN, R. L. (1999). Fractal layout organization for job shop environments. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 3, pp. 501-521.

MOORE, J. (1962). Plant Layout and Design. MacMillan Publishing Company inc., 566 pages.

MUTHER, R. (1973). Systematic Layout Planning. Management & Industrial Research Publications, 375 pages.

NADLER, G. (1967). Work Systems Design : The IDEALS Concept. Richard D. Irwin, 183 pages.

NANDKEOLYAR, U., RAO, S. S., RANA, K. (1993). Facility life cycles. Omega, vol. 21, no. 2, pp. 245-254.

NEELY, A., GREGORY, M., PLATTS, K. (1995). Performance measurement system design : a literature review and research agenda. International Journal of Operations & Production Management, vol. 15, no. 4, pp. 80-116.

NEGHBAT, F. (1974). An efficient equipment-layout algorithm. Operations Research, vol. 22, pp. 622-628.

NICHOL, L. M., HOLLIER, R. H. (1983). Plant layout in practice. Material Flow, vol. 1, pp. 177-188.

NUGENT, C. E., VOLLMANN, T. E., RUML, J. (1968). An experimental comparison of techniques for the assignment of facilities to locations. Operations Research, vol. 16, no. 1, pp. 156-173.

O'BRIEN, C., ABDEL BARR, S. E. Z. (1980). An interactive approach to computer aided facility layout. International Journal of Production Research, vol. 18, no. 2, pp. 201-211.

OPITZ, H., WIENDAHL, H.-P. (1971). Group technology and manufacturing systems for small and medium quantity production. International Journal of Production Research, vol. 9, no. 1, pp. 181-203.

PESCH, E., GLOVER, F., BARTSCH, T., SALEWSKI, F., OSMAN, I. (1999). Efficient facility layout planning in a maximally planar graph model. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 2, pp. 263-283.

PICARD, J.-C., RATLIFF, H. D. (1978). A cut approach to the rectilinear distance facility location problem. Operations Research, vol. 26, no. 3, pp. 423-433.

PICARD, J.-C., QUEYRANNE, M. (1981). On the one-dimensional space allocation problem. Operations Research, vol. 29, no. 2, pp. 371-391.

RAM, R., VISWANADHAM, N. (1992). Performance evaluation of cellular flexible manufacturing systems : a decomposition approach. European Journal of Operational Research, vol. 57, pp. 287-304.

RAO, H. A., PHAM, S. N., GU, P. (1999). A genetic algorithms-based approach for design of manufacturing systems : an industrial application. International Journal of Production Research, vol. 37, no. 3, pp. 557-580.

RAOOT, A. D., RAKSHIT, A. (1991). A fuzzy approach to facilities layout planning. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 4, pp. 835-857.

RAOOT, A. D., RAKSHIT, A. (1993). A linguistic pattern approach for multiple criteria facility layout problems. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 1, pp. 203-222.

REED, R. Jr. (1967). Plant Location, Layout, and Maintenance. Richard D. Irwin (193 pages).

REMBOLD, B., TANCHOCO, J. M. A. (1994). Material flow system model evaluation and improvement. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 11, pp. 2585-2602.

ROSENBLATT, M. J. (1979). The facilities layout problem : a multi-goal approach. International Journal of Production Research, vol. 17, no. 4, pp. 323-332.

ROSENBLATT, M. J. (1986). The dynamics of plant layout. Management Science, vol. 32, no. 1, pp. 76-86.

ROSENBLATT, M. J., LEE, H. L. (1987). A robustness approach to facilities design. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 4, pp. 479-486.

ROSENBLATT, M. J., KROPP, D. H. (1992). The single period stochastic plant layout problem. IEE Transactions, vol. 24, no. 2, pp. 169-176.

SAFIZADEH, M. H., McKENNA, D. R (1996). Application of multidimensional scaling techniques to facilities layout. European Journal of Operational Research, vol. 92, no. 1, pp. 54-62.

SARIN, S. C., LOHARJUN, P., MALMBORG, C. J., KRISHNAKUMAR, B. (1992). A multiattribute decision-theoretic approach for the layout design problem. European Journal of Operational Research, no. 57, pp. 231-242.

SARKER, B. R., YU, J. (1994). A two-phase procedure for duplicating bottleneck machines in a linear layout, cellular manufacturing system. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 9, pp. 2049-2066.

- SEIFODDINI, H., HSU, C.-P. (1994). Comparative study of similarity coefficients and clustering algorithms in cellular manufacturing. Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, no. 2, pp. 119-127.
- SEIFODDINI, H., DJASSEMI, M. (1996a). A new grouping measure for evaluation of machine-component matrices. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 5, pp. 1179-1193.
- SEIFODDINI, H., DJASSEMI, M. (1996b). Improving the performance of cellular manufacturing by a dynamic part assignment approach. Computers & Industrial Engineering, vol. 30, no. 4, pp. 719-726.
- SHAFFER, S. M., ROGERS, D. F. (1993). Similarity and distance measures for cell manufacturing, Part II. An extension and comparison. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 6, pp. 1315-1326.
- SHIH, L. C., ENKAWA, T., ITOH, K. (1992). An AI-search technique-based layout planning method. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 12, pp. 2839-2855.
- SHIKO, G. (1992). A process planning-orientated approach to part family formation problem in group technology applications. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 8, pp. 1739-1752.
- SIRINAOVAKUL, B., THAJCHAYAPONG, P. (1994). A knowledge base to assist a heuristic search approach to facility layout. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 1, pp. 141-160.
- SKORIN-KAPOV, J. (1990). Tabu search applied to the quadratic assignment problem. ORSA Journal on Computing, vol. 2, no. 1, pp. 33-45.
- SRINIVASAN, G., NARENDHAN, T. T. (1991). GRAFICS - a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 3, pp. 463-478.

STATISTIQUES CANADA (1994). Industries Manufacturières du Canada : niveaux national et provincial. Catalogue #31-203-XPB.

SULE, D. R. (1994). Manufacturing Facilities : Location, Planning, and Design. PWS Publishing Company, Boston, 2^e édition, 722 pages.

SURESH, G., VINOD, V. V., SAHU, S. (1995). A genetic algorithm for facility layout. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 12, pp. 3411-3423.

SVESTKA, J. A. (1990). MOCRAFT : a professional quality micro-computer implementation of CRAFT with multiple objectives. Computers & Industrial Engineering, vol. 18, no. 1, pp. 13-22.

TAM, K. Y. (1992). A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 1, pp. 63-87.

TANGUY, J. C. (1995). Diagnostics et outils pour l'amélioration des performances de l'entreprise au niveau atelier. Travail et Méthodes, vol. 520, pp. 15-20.

TATE, D. M., SMITH, A. E. (1994). Unequal area facility layout using genetic search. Document de travail, 23 pages.

TOMPKINS, J. A., WHITE, J. A., BOZER, Y. A., FRAZELLE, E. H., TANCHOCO, J. M. A., TREVINO, J. (1996). Facilities Planning. John Wiley & Sons Inc, New York, 2^e édition, 734 pages.

TRETHERWAY, S. J., FOOTE, B. L. (1994). Automatic computation and drawing of facility layouts with logical aisle structures. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 7, pp. 1545-1555.

TSUCHIYA, K., BHARITKAR, S., TAKEFUJI, Y. (1996). A neural network approach to facility layout problems. European Journal of Operational Research, vol. 89, no. 3, pp. 556-563.

URBAN, T. L. (1987). A multiple criteria model for the facilities layout problem. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 12, pp. 1805-1812.

URBAN, T. L. (1993). A heuristic for the dynamic facility layout problem. IIE Transactions, vol. 25, no. 4, pp. 57-63.

USHER, J. S., CIESIELSKI, C. A., JOHANSON, R. A. (1990). Redesigning an existing layout presents a major challenge - and produces dramatic results. IE, pp. 45-49.

VENKATADRI, U., RARDIN, R. L., MONTREUIL, B. (1997). A design methodology for fractal layout organization. IIE Transactions, vol. 29, pp. 911-924.

VERMA, P., DING, F.-Y. (1995). A sequence-based materials flows procedure for designing manufacturing cells. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 12, pp. 3267-3281.

WÄSCHER, G., CHAMONI, P. (1987). MICROLAY : An interactive computer program for factory layout planning on microcomputers. European Journal of Operational Research, vol. 31, pp. 185-193.

WATSON, K. H., GIFFIN, J. W. (1997). The vertex splitting algorithm for facilities layout. International Journal of Production Research, vol. 35, no. 9, pp. 2477-2492.

WILHELM, M. R., WARD, T. L. (1987). Solving quadratic assignment problems by 'simulated annealing'. IIE Transactions, pp. 107-119.

YAMAN, R., GETHIN, D. T., CLARKE, M. J. (1993). An effective sorting method for facility layout construction. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 2, pp. 413-427.

ANNEXE 1
LISTE DES CRITÈRES DE MUTHER (1973) POUR
L'ÉVALUATION DE L'IMPLANTATION

- 1- Possibilité d'expansion
- 2- Adaptabilité aux fluctuations dans les produits et les quantités
- 3- Flexibilité de l'implantation dans le cas d'un changement de méthodes
- 4- Efficacité des déplacements
- 5- Efficacité de la manutention
- 6- Efficacité de l'entreposage
- 7- Utilisation de l'espace
- 8- Efficacité de l'intégration des services auxiliaires
- 9- Sécurité et facilité de nettoyage
- 10- Conditions de travail des employés
- 11- Facilité de surveillance et de contrôle
- 12- Effets sur les relations promotionnelles et publiques de l'entreprise
- 13- Qualité des produits et risque d'endommager ceux-ci
- 14- Contraintes associées à la maintenance
- 15- Conséquent avec la structure organisationnelle de l'entreprise
- 16- Utilisation des équipements
- 17- Sécurité des installations
- 18- Effets des conditions naturelles
- 19- Capacité de respecter la demande
- 20- Conséquent avec la planification à long terme de l'entreprise

ANNEXE 2

REVUE DE LITTÉRATURE POUR LA RÉVISION DE L'IMPLANTATION

Tableau A2.1 Causes de révision de l'implantation, par auteurs

AUTEURS	CAUSES
El-Rayah et Hollier (1970)	<ul style="list-style-type: none"> • Degré de complexité • Coût des activités de contrôle de production • Distance parcourue • Fréquence des déplacements • Volume déplacé • Méthodes de manutention et coûts • Inventaire de produits en-cours • Délais de fabrication
Apple (1977)	<ul style="list-style-type: none"> • Changement dans le design • Changements dans la structure de produits • Remplacement d'équipements désuets • Changements dans les méthodes de production • Variation du dimensionnement des départements • Ajout ou déplacement d'un département • Réduction de coûts de fabrication • Planification de nouvelles installations
Afentakis et al. (1990)	<ul style="list-style-type: none"> • Importants espaces d'entreposage des en-cours • Important inventaire des en-cours • Importants délais de fabrication • Mécanismes de contrôle plus importants

Tableau A2.1 Causes de révision de l'implantation, par auteurs (suite)

AUTEURS	CAUSES
Galbraith et Miller (1990)	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures quantitatives : <ul style="list-style-type: none"> - Efficacité du flux - Distance de déplacements - Relations entre les activités critiques - Variation du dimensionnement des activités critiques - Capacité d'expansion • Facteurs qualitatifs : <ul style="list-style-type: none"> - Linéarité du flux - Accessibilité aux activités critiques - Respect des relations critiques
Usher et al. (1990)	<ul style="list-style-type: none"> • Sécurité • Investissements en capitaux minimums • Retours en arrière • Inventaire des en-cours • Contrôle de production • Rejets et rebuts (quantité, provenance et entreposage) • Produits endommagés • Distance parcourue par les employés et les produits • Engorgement d'allées
Cambron et Evans (1991)	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts : <ul style="list-style-type: none"> - Déplacement efficace du matériel - Déplacement efficace du personnel - Facilité d'expansion - Bonne utilisation et configuration de l'espace - Adaptabilité aux changements dans les procédés et les équipements • Environnement : <ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du bruit - Supervision efficace - Sécurité - Esthétique

Tableau A2.1 Causes de révision de l'implantation, par auteurs (suite)

AUTEURS	CAUSES
Jajodia et al. (1992)	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de manutention du matériel • Engorgement d'allées • Accessibilité • Intersection des flux de circulation • Tableau des relations interactivités
Yaman et al. (1993)	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensions minimales • Ratio du coût idéal de manutention pour chaque produit par rapport au coût actuel
Hassan (1994)	<ul style="list-style-type: none"> • Taux d'utilisation des machines • Durées et longueurs des files d'attente • Retours en arrière et déviations ("bypassing") • Degré d'automatisation
Tompkins et al. (1996)	<ul style="list-style-type: none"> • Associés aux produits : design, ajout/retrait, quantité (saisonnier, hausse/baisse) • Associés aux procédés : séquence, types d'équipements, équipements spécialisés vs d'utilisation générale • Associés à la production : bris et pannes, horaire de travail, disponibilité (outils et matériel), capacité • Associés au management : structure organisationnelle, philosophie de management

Tableau A2.2 Mesures d'évaluation de la manutention, proposées par Jabot (1977)

<ul style="list-style-type: none"> • salaires de manutention/salaire total • nombre d'heures de manutention/nombre total d'heures • total des temps de fabrication/délai de fabrication • nombre d'opérations de manutention/nombre d'opérations de fabrication • nombre d'en-cours/chiffre d'affaires annuel • taux d'utilisation (par observations instantanées)
--

**Tableau A2.3 Critères d'évaluation d'alternatives d'aménagement de
Lin et Sharp (1999a et b), par classes et thèmes**

THÈMES	CLASSES	CRITÈRES
Coût (quantitatif)	Inventaire	<ul style="list-style-type: none"> • Matière première • En-cours • Produits finis
	Autres	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts initiaux : <ul style="list-style-type: none"> - terrain, bâtiments, production, équipements, matériels, manutention • Coût annuel d'opération et de maintenance : <ul style="list-style-type: none"> - main-d'oeuvre, services, maintenance • Valeur résiduelle
Flux (quantitatif)	Relation d'espace	<ul style="list-style-type: none"> • Encombrement de surface (colonnes et autres) • Espace suffisant et leur utilisation : <ul style="list-style-type: none"> - ratio d'espaces inoccupés - distribution des espaces inoccupés
	Mouvement de matériel	<ul style="list-style-type: none"> • Allée : <ul style="list-style-type: none"> - aire desservie par le réseau/longueur d'allées - ratio de formes des départements - nombre d'intersections • Distance et densité des déplacements : <ul style="list-style-type: none"> - somme des distances * volumes déplacés - temps de déplacements + prise & dépose
	Stabilité et flexibilité	<ul style="list-style-type: none"> • Stabilité de la capacité des équipements : <ul style="list-style-type: none"> - capacité disponible/nécessaire • Expansion du bâtiment
Environnement (qualitatif)	Voisinage	<ul style="list-style-type: none"> • Topographie et topologie • Communauté
	Qualité	<ul style="list-style-type: none"> • Sécurité des employés • Confort des employés • Sécurité des équipements et matériels • Accessibilité pour la maintenance

Tableau A2.4 Mesures d'évaluation d'alternatives d'implantation, proposées par Konz (1985)

CATÉGORIES	MESURES
Utilisation des ressources	<ul style="list-style-type: none"> ● Main-d'oeuvre : <ul style="list-style-type: none"> - salaires (manut. directe/total) - salaires (manut. par employés de production/total) ● Équipements (par observations) : <ul style="list-style-type: none"> - vitesse de dépl./standard * poids déplacé/standard - nbre d'observations(actif)/nbre total d'observations ● Espace (en 3 dimensions) : <ul style="list-style-type: none"> - espace occupé/total - espace pour les allées/total ● Énergie : <ul style="list-style-type: none"> - KWh/volume total du bâtiment
Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> ● Matériels : <ul style="list-style-type: none"> - ventes annuelles (\$)/inventaire de fin de période (\$) - par période : nbre de lignes de commandes complétées/ nbre total de lignes de commandes ● Déplacements : <ul style="list-style-type: none"> - par produits : nbre de dépl./nbre d'opérations - par produits : distance totale parcourue/nbre de dépl. ● Pertes : <ul style="list-style-type: none"> - unités de charge : nbre endommagé/total - inventaire (\$) : réel/estimé
Efficacité des activités	<ul style="list-style-type: none"> ● Production : <ul style="list-style-type: none"> - temps-machine/temps total, - nbre de commandes en retard/nbre complétées. ● Entreposage/Récupération : <ul style="list-style-type: none"> - nbre de lignes de commandes complétées/heures de travail. ● Réception/Expédition : <ul style="list-style-type: none"> - quantité expédiée/heures de travail.

Tableau A2.5 Ratios de productivité décrits par Sule (1994)

• Ratio de la main-d'oeuvre de manutention	=	main-d'oeuvre affectée à la manutention/main-d'oeuvre totale
(en terme de quantité ou de coût)		
• Ratio d'utilisation des équipements de manutention	=	déplacements à l'heure/capacité théorique de manutention
(en terme de quantité ou de poids)		
• Ratio d'utilisation des espaces d'entreposage	=	espace occupé/espace disponible
• Proportion d'espaces des allées	=	espace occupé par les allées/espace total
• Ratio des déplacements en fonction des opérations	=	nbre de déplacements/nbre d'opérations productives
• Efficacité du cycle de production	=	temps d'opérations/temps écoulé dans les départements de production
• Ratio des produits endommagés	=	nbre de charges endommagées/nbre total de charges
• Ratio d'énergie en entrepôt	=	consommation en BTU/volume de l'entrepôt

ANNEXE 3

EXEMPLE D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE L'INDICATEUR #6 - RATIO DE RETOURS EN ARRIÈRE

1) Définition des allées principales et secondaires de circulation

De façon théorique, les allées principales sont unidirectionnelles et les allées secondaires, bidirectionnelles.

2) Initialisation des variables

retours = 0 { la distance totale associée aux retours en arrière }

total = 0 { la distance totale parcourue pour la production }

3) Calculs

Pour chaque famille de produits f :

 Pour chaque produit particulier p :

 comptedépl (θ) = 0, { nombre de déplacements sur le segment d'allée particulier θ }

 Pour chaque opération o :

 Pour le segment unitaire utilisé pour passer des opérations o à o + 1 :

 comptedépl (θ) = comptedépl (θ) + 1

 total = total + longueur (θ) * Q (p,f,o,o+1)

 Pour tous les segments n'appartenant pas à un circuit :

 Pour tous les segments d'allées principales et si comptedépl (θ) > 1 alors:

 retours = retours + (comptedépl (θ) - 1) * longueur(θ)*Q (p,f,o,o+1)

 Pour tous les segments d'allées secondaires

 et si comptedépl (θ) > 2 alors:

 retours = retours + (comptedépl (θ) - 2) * longueur(θ)*Q (p,f,o,o+1)

4) Résultat

IND6 = retours/total

ANNEXE 4

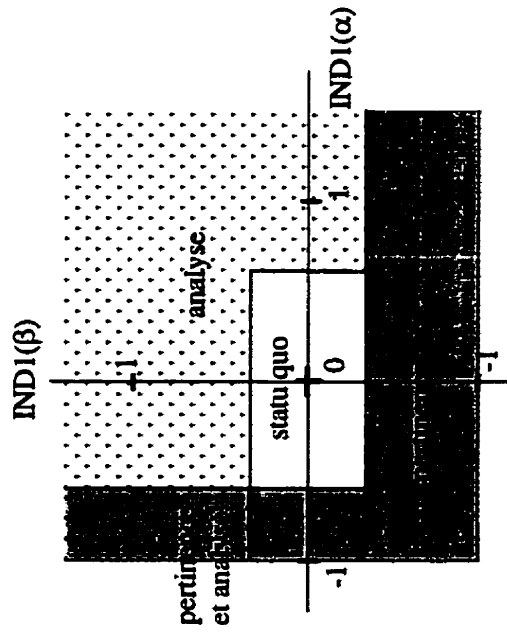
RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS ET DES DOMAINES DE SOLUTIONS

POUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE PROPOSÉS

IND1 - Ratio de quantité à fabriquer

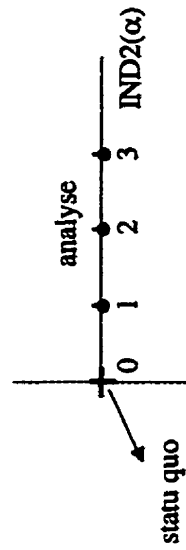
$$IND1(\alpha) = \frac{Q(\alpha, \beta, 10, m) / \sum_{p \in \beta} Q(p, \beta, 10, m)}{Q^*(\alpha, \beta, 10, m) / \sum_{p \in \beta} Q^*(p, \beta, 10, m)} - 1$$

$$IND1(\beta) = \frac{\sum_{p \in \beta} Q(p, \beta, 10, m) / \sum_f \sum_{p \in f} Q(p, f, 10, m)}{\sum_{p \in \beta} Q^*(p, \beta, 10, m) / \sum_f \sum_{p \in f} Q^*(p, f, 10, m)} - 1$$



IND2 - Ratio de procédé de fabrication

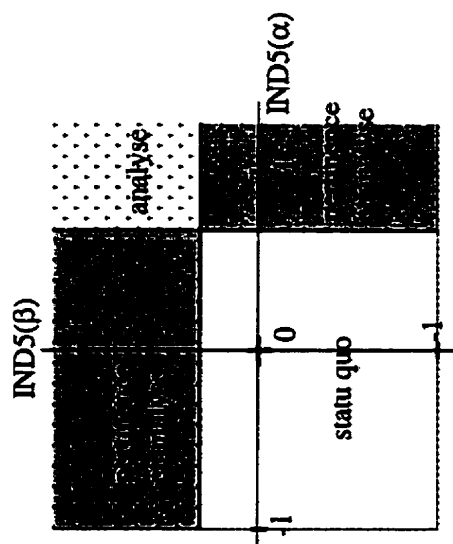
$$IND2(\alpha) = \sum_o \sum_m \left| \text{procédé}(\alpha, \beta, o, m) - \text{procédé}^*(\alpha, \beta, o, m) \right|$$



IND5 - Ratio de distance

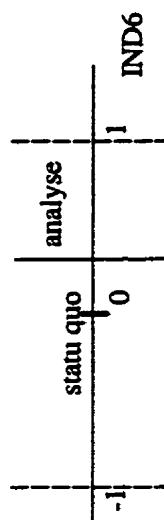
$$IND5(\alpha) = \frac{\sum_i \sum_j dist(i, j) * \text{procédé}(\alpha, \beta, i, j)}{\sum_i \sum_j dist^*(i, j) * \text{procédé}(\alpha, \beta, i, j)} - 1$$

$$IND5(\beta) = \frac{\sum_p \sum_i \sum_j dist(i, j) * \text{procédé}(p, \beta, i, j)}{\sum_p \sum_i \sum_j dist^*(i, j) * \text{procédé}(p, \beta, i, j)} - 1$$



IND6 - Ratio de retours en arrière

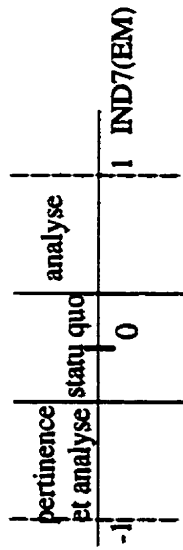
$$IND6 = \frac{\sum_i \sum_p \sum_o \sum_{j \neq i} dist(i, j) * UC(p, f, o, i) * \text{procédé}(p, f, i, j)}{\sum_i \sum_p \sum_o \sum_{j \neq i} dist(i, j) * UC(p, f, o, i) * \text{procédé}(p, f, i, j)} - \text{Retour}^*$$



IND7 - Ratio de manutention

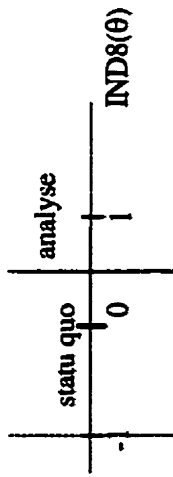
$$IND7(EM) = \frac{\sum_{obs} \sum_{m \in EM} Ofabrication(m, obs)}{\# obs * nbre(EM) - \sum_{obs} \sum_{m \in EM} Ohs(m, obs)} - \%T'(EM)$$

$$IND7(EM) = \frac{\sum_{m \in EM} \sum_f \sum_p UC(p, f, o, m) * Tusage(p, f, o, m)}{\sum_{m \in EM} (Tdisp(m) - \%Ths(m) * Tmanut_total(m))} - \sum_p T'(m)$$



IND8 - Ratio d'engorgement

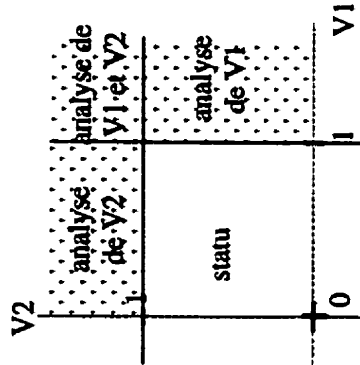
$$IND8(\theta) = \frac{\sum_f \sum_p \sum_o \sum_i \sum_j D(i, j) * UC(p, f, o, i) * procédé(p, f, i, j)}{densité'(\theta)} - 1$$



IND9 - Ratio d'entreposage

$$V1 = \frac{\text{officiel (occupé)} / \text{officiel (total)}}{\text{officiel}^*}$$

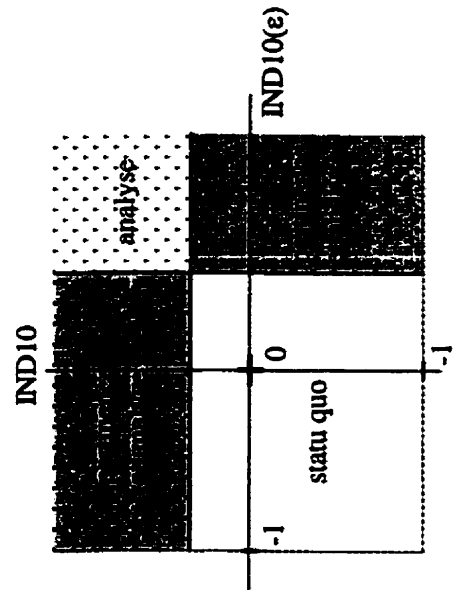
$$V2 = \frac{\text{autre (occupé)} / \text{officiel (occupé)}}{\text{entrepôt}^*}$$



IND10 - Ratio de l'horaire de travail

$$\text{IND10}(\varepsilon) = \frac{\text{temps}(\varepsilon) * \text{empl}(\varepsilon)}{\sum_x \text{temps}(x) * \text{empl}(x)} - 1$$

$$\text{IND10} = \frac{\sum_x \text{temps}(x) * \text{empl}^*(x)}{\sum_x \text{temps}^*(x) * \text{empl}^*(x)} - 1$$



ANNEXE 5

MODÈLES ET MÉTHODES DE LA LITTÉRATURE ASSOCIÉS AU PROBLÈME DE REGROUPEMENT

**Tableau A5.1 Classification des techniques de résolution du
problème de regroupement**

- 1- Méthodes heuristiques
 - Basées sur des manipulations de la matrice de contingence
 - Basées sur le calcul de coefficients de similarité
- 2- Méthodes d'optimisation
- 3- Théorie des graphes
- 4- Intelligence artificielle

1- Méthodes heuristiques

Cette catégorie de méthodes se divise en deux parties : les méthodes basées sur des manipulations de la matrice de contingence machine-composant, et les autres méthodes, basées sur le calcul de coefficients de similarité.

Une des premières méthodes de regroupement machine-composant est introduite par Burbidge (1975). Sa méthode est basée sur l'analyse visuelle de la matrice de contingence machine-composant. Dix pour cent des machines associées au taux maximum de visites sont mises de côté lors de l'évaluation initiale de la matrice. En se basant sur cette matrice modifiée, le regroupement est effectué et, par la suite, les machines initialement éliminées sont prises en compte. Lors de la génération de la solution, la contrainte de capacité des machines doit être respectée. Faisant suite aux travaux de Burbidge (1975), le modèle de Ballakur et Steudel (1987) considère d'autres contraintes telles que le nombre maximal de machines par cellule et le pourcentage d'opérations complétées d'un produit dans une cellule. Pour l'une ou l'autre de ces méthodes, la séquence des opérations, critère de regroupement que nous considérons primordial, est exclue de leur analyse.

Divers modèles de littérature axés sur la résolution du problème de regroupement, ainsi que leurs caractéristiques, sont présentés au tableau A5.2. Ces modèles sont associés à la diagonalisation de la matrice de contingence machine-composant. McCormick et al. (1972) sont les pionniers pour l'établissement d'une méthode pour la résolution de problème de regroupement. Leur méthode a pour objectif la maximisation d'une mesure d'efficacité reliant les éléments précédents et subséquents de la matrice machine-composant, celle-ci ne tenant pas compte de la séquence des opérations. Les permutations des lignes et des colonnes se font de façon alternée. Une autre méthode sur laquelle divers autres auteurs se basent est celle de King (1980). Il présente un algorithme basé sur le tri des éléments pondérés selon une base 2.

Tableau A5.2 Modèles et méthodes basés sur la matrice de contingence machine-composant

MODÈLES / MÉTHODES	CARACTÉRISTIQUES
<i>Bond Energy Algorithm</i> de McCormick et al. (1972)	MAX mesure d'efficacité; permutations lignes-colonnes alternées.
Chandrasekharan et Rajagopalan (1986b)	MIN déplacements intercellulaires; graphe bipartite pour l'établissement de la borne supérieure du nombre de cellules; étape d'amélioration de regroupement utilisant une méthode de germination.
Sule (1991)	MIN coûts de manutention intercellulaire et d'équipement; affectation de machines à des familles de produits; contrainte de capacité.
Sarker et Yu (1994)	MIN déplacements intercellulaires; MIN coûts de dédoublement de machines et de manutention; objectif : localisation de cellules.
Chen et al. (1995)	MIN déplacements intercellulaires; méthode de recuit simulé; contrainte du nombre maximum de cellules; contrainte du nombre de machines par cellule.
Adil et al. (1996)	MIN pondérée des éléments nuls et d'exception; Méthode du recuit simulé; duplication de machines.

Tableau A5.2 Modèles et méthodes basés sur la matrice de contingence machine-composant (suite)

MODÈLES / MÉTHODES	CARACTÉRISTIQUES
Variantes du modèle <i>Rank Order Clustering</i> de King (1980) :	
King et Nakornchai (1982)	fin des itérations $\neq F$ (borne inférieure) $= F$ (temps écoulé).
MODROC de Chandrasekharan et Rajagopalan (1986a)	inclut une étape d'identification des cellules pour le regroupement des produits.
ZODIAC de Chandrasekharan et Rajagopalan (1987)	pas de maximum du nombre de cellules à former; différentes méthodes de germination : - méthode de germination artificielle, - méthode de germination naturelle; génération alternée de groupes de machines et de produits; critères d'arrêt.
Co et Araar (1988)	MAX nombre de produits visitant une seule cellule; MAX du nombre de cellules.
Boe et Cheng (1991)	permutation indépendante des lignes et colonnes; mesure de voisinage (multiplicatif).
GRAFICS de Srinivasan et Narendran (1991)	MIN déplacements intercellulaires et machines inutilisées par groupe; utilisation d'une méthode de germination; génération alternée de groupes de machines et de produits; critères d'arrêt.

Le coefficient de Jaccard de McAuley (1972) est la pierre angulaire de la majorité des modèles et des méthodes associés au calcul de la similarité de toutes paires d'éléments. Il est basé sur la matrice de contingence machine-composant où les éléments de la matrice sont de type binaire. L'établissement des différentes familles de produits à l'aide de coefficients de similarité est exécuté de façon itérative. La méthode est dite de type hiérarchique, c'est-à-dire qu'à chaque itération la fusion de deux sous-ensembles est fonction de la valeur maximale de l'ensemble des coefficients de similarité associés aux paires de combinaisons. Les diverses méthodes proposées pour le

regroupement de deux entités sont fonction de la sélection par rapport aux deux coefficients de similarité associés : à la plus grande valeur (SLINK), à la plus petite valeur (CLINK), à la moyenne des valeurs (ALINK), et à la moyenne pondérée des valeurs (WLINK). CLINK est la méthode de mise à jour de coefficients de similarité la plus utilisée dans la littérature. Contrairement à ces méthodes, l'heuristique de Luong (1993) est basée sur la notion de similarité pour tous les éléments du groupe et non pour les paires d'éléments à regrouper.

Le tableau suivant présente divers modèles élaborés au fil des ans et leurs caractéristiques. Murthy et Srinivasan (1995) utilisent une mesure de distance pour l'évaluation de deux paires d'éléments. La distance est un coefficient déterminant la différence de leurs opérations, et non leur similitude.

Tableau A5.3 Modèles et méthodes de regroupement à l'aide de coefficients de similarité

MODÈLES / MÉTHODES	CARACTÉRISTIQUES
MACE de Waghodekar et Sahu (1984)	MIN déplacements intercellulaires; coefficient de similarité de type multiplicatif.
Choobineh (1988)	mesure de proximité; regroupement consécutif des produits et des machines.
Gupta et Seifoddini (1990)	MAX coefficients de similarité; MAX déplacements intracellulaires; regroupement simultané des machines et des produits; volume moyen de production; séquence des opérations; temps des opérations.

Tableau A5.3 Modèles et méthodes de regroupement à l'aide de coefficients de similarité (suite)

Harhalakis et al. (1990)	<p>MIN déplacements normalisés intercellulaires;</p> <p>algorithme : 1- chaque machine = 1 cellule,</p> <p>2- regroupement des cellules,</p> <p>3- révision de l'affectation des machines;</p> <p>contrainte du nombre de machines par cellule;</p> <p>volume de production;</p> <p>séquence des opérations.</p>
Shiko (1992)	<p>séquences des opérations;</p> <p>coefficient de similarité pondéré :</p> <ul style="list-style-type: none"> - du type des opérations, - de la séquence des opérations, - de la similarité du rang des opérations.
Ferreira Ribeiro et Pradin (1993)	<p>MIN déplacements intercellulaires;</p> <p>index de disparité pour les produits ("dissimilarity index");</p> <p>bornes inférieure et supérieure du nombre de machines par cellule;</p> <p>regroupement consécutif des produits et des machines.</p>
Gupta (1993)	<p>gammes alternatives de production;</p> <p>similarité entre machines;</p> <p>volume de production;</p> <p>séquence des opérations;</p> <p>temps d'opérations.</p>
Ho et al. (1993)	<p>regroupement des produits;</p> <p>coefficient de similarité de la séquence des opérations;</p> <p>bornes supérieure et inférieure de l'utilisation des machines.</p>
Luong (1993)	<p>similarité entre cellules plutôt qu'entre machines;</p> <p>contrainte du nombre de machines par cellule;</p> <p>valeur minimale de la similarité des éléments pour une cellule.</p>
Hon et Chi (1994)	<p>algorithme génétique;</p> <p>coefficients de similarité;</p> <p>bornes inférieures et supérieures du nombre de cellules et de machines par cellules.</p>

Tableau A5.3 Modèles et méthodes de regroupement à l'aide de coefficients de similarité (suite)

MODÈLES / MÉTHODES	CARACTÉRISTIQUES
Seifoddini et Hsu (1994)	MIN déplacements intercellulaires; regroupement de produits; pondération = F (utilisation commune de machines).
Gopalakrishnan et Mukhopadhyay (1995)	analyse vectorielle; similarité entre deux machines = $F(\cos \theta)$; regroupement des produits basé sur celui des machines.
Murthy et Srinivasan (1995)	MIN déplacements intercellulaires; méthode du recuit simulé; cellule fictive = partie "par procédés" de l'usine; mesure de distance.
Verma et Ding (1995)	MIN coûts de manutention; regroupement de machines; déplacements inter- et intracellulaires; coûts associés aux produits ayant un flux non standard; séquence des opérations; volume de production.
Gupta et al. (1996)	MIN déplacements intercellulaires; MIN variation d'utilisation des cellules; algorithme génétique.

2- Méthodes d'optimisation

La programmation mathématique et la méthode de l'évaluation et de séparation progressive (méthode ÉSP) sont utilisées depuis peu pour la résolution du problème de regroupement. L'un des premiers modèles utilisant la programmation mathématique est le *P-médiane* de Kusiak (1987). Il permet une génération de familles de produits à partir de laquelle les cellules de fabrication sont établies. Kusiak (1987) propose aussi un concept généralisé de la technologie de groupe. Il intègre à son modèle la sélection de la gamme de production d'un produit parmi les différentes alternatives

réalisables, dans un but de maximiser de la similitude des gammes de fabrication pour chaque famille de produits. Le tableau A5.4 résume les caractéristiques de différents modèles et méthodes d'optimisation.

Tableau A5.4 Modèles et méthodes de regroupement basés sur l'optimisation mathématique

MODÈLES / MÉTHODES	CARACTÉRISTIQUES
Variantes du modèle <i>P-médiane</i> de Kusiak (1987) :	
Shtub (1989)	MIN coûts d'affectation; formulation plus générale du <i>P-médiane</i> ; borne inférieure et supérieure pour l'utilisation de machines.
Wei et Kern (1989)	regroupement en fonction des machines; coefficient de similarité multiplicatif ("commonality score"); contrainte du nombre de cellules; contrainte du nombre de machines par cellule.
Srinivasan et al. (1990)	problème du commis-voyageur.
Kusiak et Cho (1992)	méthode ÉSP; gammes alternatives de production; agrégation initiale : si un produit \subseteq un autre.
Rajamani et al. (1992)	compromis entre le respect de la séquence des opérations et les coûts de dédoublement de machines.
Ho et al. (1993)	réseau de flux; arcs orientés; volume de production.
Atmani et al. (1995)	MIN coûts opérationnels, de mise en course et de manutention; gammes alternatives de production, mais sans relations d'antériorités; volume de production.

Tableau A5.4 Modèles et méthodes de regroupement basés sur l'optimisation mathématique (suite)

Dahel (1995)	MIN déplacements intercellulaires; contrainte de localisation des cellules pour éliminer les retours en arrière entre cellules; pas de séquence intracellulaire des opérations; contrainte du nombre de machines par cellule; contrainte de capacité; volume de production connue a priori.
Suresh et al. (1995)	MIN variation d'utilisation des cellules; MIN déplacements intercellulaires; MIN du dédoublement de machines; incluant une étape utilisant un réseau de neurones; contrainte de capacité; contrainte du nombre de machines par cellule;
Cheng et al. (1996)	mesure de distance; affectation des machines à des cellules.

3- Théorie des graphes

La théorie des graphes, telle que les concepts de graphe bipartite, reliant les produits et les machines, et de réseau de flux, représentant le flux entre paires de machines, est une autre catégorie de modèles et de méthodes applicable au problème de regroupement de machines et de produits. Le tableau A5.5 présente différents algorithmes de résolution du problème de regroupement.

Tableau A5.5 Modèles et méthodes de regroupement basés sur la théorie des graphes

MODÈLES / MÉTHODES	CARACTÉRISTIQUES
Rajagopalan et Batra (1975)	regroupement de machines; analyse visuelle du graphe.
Vannelli et Kumar (1986)	MIN du dédoublement de machines; graphe bipartite; objectif : graphe dissocié.
Lee et Garcia-Diaz (1993)	MIN mesure de distance ("dissimilarity measure"); réseau de flux : $2M$ noeuds et M^2 arcs; regroupement de machines.
Vannelli et Hall (1993)	MIN des coûts; graphe bipartite; stratégies : dédoublement de machines et fabrication des produits en usine ou par contrat; objectif : graphe dissocié.

4- Intelligence artificielle

Cette catégorie chapeaute plusieurs avenues de recherche récemment explorées : les systèmes experts, la théorie des ensembles flous et l'approche par réseaux de neurones. Selon le degré d'avancement de la recherche, ces modèles sont basés sur la matrice de contingence machine-composant ou sur un ensemble de données plus complexes incluant la séquence des opérations, les gammes alternatives de fabrication, les coûts d'opération et de manutention, et autres critères. Des exemples de modèles associés aux diverses classes de procédure sont énumérés au tableau suivant.

Tableau A5.6 Modèles et méthodes de regroupement basés sur l'intelligence artificielle

MODÈLES	CARACTÉRISTIQUES
Chu et Hayya (1991)	degré d'appartenance d'un produit par rapport à sa famille; matrice de contingence.
Kaparthi et Suresh (1992)	approche par réseau de neurones; matrice de contingence.
Chung et Kusiak (1994)	similarité de forme des produits.
Venugopal et Narendran (1994)	approche par réseau de neurones.
Basu et al. (1995)	système expert.
Burke et Kamal (1995)	théorie des ensembles flous; coefficients de similarité.
Kamal et Burke (1996)	approche par réseau de neurones; séquence des opérations; design de produits; temps unitaires de fabrication; volume de production.

RÉFÉRENCES

- ADIL, G. K., RAJAMANI, D., STRONG, D. (1996). Cell formation considering alternative routings. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 5, pp. 1361-1380.
- ATMANI, A., LASHKARI, R. S., CARON, R. J. (1995). A mathematical programming approach to joint cell formation and operation allocation in cellular manufacturing. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 1, pp. 1-15.
- BALLAKUR, A., STEUDEL, H. J. (1987). A within-cell utilization based heuristic for designing cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 5, pp. 639-665.
- BASU, A., HYER, N., SHTUB, A. (1995). An expert system based approach to manufacturing cell design. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 10, pp. 2739-2755.
- BOE, W. J., CHENG, C. H. (1991). A close neighbor algorithm for designing cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 10, pp. 2097-2116.
- BURBIDGE, J. L. (1975). The Introduction of Group Technology. Wiley, New York.
- BURKE, L. I., KAMAL, S. (1995). Neural networks and part family/machine group formation problem in cellular manufacturing : a framework approach using fuzzy ART. Journal of Manufacturing Systems, vol. 14, no. 3, pp. 148-159.
- CHANDRASEKHARAN, M. P., RAJAGOPALAN, R. (1986a). MODROC : an extension of rank order clustering for group technology. International Journal of Production Research, vol. 24, no. 5, pp. 1221-1233.

CHANDRASEKHARAN, M. P., RAJAGOPALAN, R. (1986b). An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing. International Journal of Production Research, vol. 24, no. 2, pp. 451-464.

CHANDRASEKHARAN, M. P., RAJAGOPALAN, R. (1987). ZODIAC : an algorithm for concurrent formation of part-families and machine-cells. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 6, pp. 835-850.

CHEN, C.-L., COTRUVO, N. A., BAEK, W. (1995). A simulated annealing solution to the cell formation problem. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 9, pp. 2601-2614.

CHENG, C.-H., MADAN, M. S., MOTWANI, J. (1996). Designing cellular manufacturing systems by a truncated tree search. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 2, pp. 349-361.

CHOOBINEH, F. (1988). A framework for the design of cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 7, pp. 1161-1172.

CHU, C.-H., HAYYA, J. C. (1991). A fuzzy clustering approach to manufacturing cell formation. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 7, pp. 1475-1487.

CHUNG, Y., KUSIAK, A. (1994). Grouping parts with a neural network. Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, no. 4, pp. 262-275.

CO, H. C., ARAAR, A. (1988). Configuring cellular manufacturing systems. International Journal of Production Research, vol. 26, no. 9, pp. 1511-1522.

DAHEL, N.-E. (1995). Design of cellular manufacturing systems in tandem configuration. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 8, pp. 2079-2095.

FERREIRA RIBEIRO, J. F., PRADIN, B. (1993). A methodology for cellular manufacturing design. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 1, pp. 235-250.

GOPALAKRISHNAN, A., MUKHOPADHYAY, S. K. (1995). A vector analytic (VECAN) method for solving the machine-part grouping problem in GT. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 3, pp. 795-818.

GUPTA, T., SEIFODDINI, H. (1990). Production data based on similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of a cellular manufacturing system. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 7, pp. 1247-1269.

GUPTA, T. (1993). Design of manufacturing cells for flexible environment considering alternative routing. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 6, pp. 1259-1273.

GUPTA, Y., GUPTA, M., KUMAR, A., SUNDARAM, C. (1996). A genetic algorithm-based approach to cell composition and layout design problems. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 2, pp. 447-482.

HARHALAKIS, G., NAGI, R., PROTH, J. M. (1990). An efficient heuristic on manufacturing cell formation for group technology applications. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 1, pp. 185-198.

HO, Y.-C., LEE, C.-E. C., MOODIE, C. L. (1993). Two-sequence pattern, matching-based, flow analysis methods for multi-flowlines layout design. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 7, pp. 1557-1578.

HON, K. K. B., CHI, H. (1994). A new approach of group technology part families optimization. CIRP Annals, vol. 43, no. 1, pp. 425-428.

KAMAL, S., BURKE, L. I. (1996). FACT : a new neural network-based clustering algorithm for group technology. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 4, pp. 919-946.

KAPARTHI, S., SURESH, N. C. (1992). Machine-component cell formation in group technology : a neural network approach. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 6, pp. 1353-1367.

- KING, J. R. (1980). Machine-component grouping in production flow analysis : an approach using a rank order clustering algorithm. International Journal of Production Research, vol. 18, no. 2, pp. 213-232.
- KING, J. R., NAKORNCHAI, V. (1982). Machine-component group formation in group technology: review and extension. International Journal of Production Research, vol. 20, no. 2, pp. 117-133.
- KUSIAK, A. (1987). The generalized group technology concept. International Journal of Production Research, vol. 25, no. 4, pp. 561-569.
- KUSIAK, A., CHO, M. (1992). Similarity coefficient algorithms for solving the group technology problem. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 11, pp. 2633-2646.
- LEE, H., GARCIA-DIAZ, A. (1993). A network flow approach to solve clustering problems in group technology. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 3, pp. 603-612.
- LUONG, L. H. S. (1993). A cellular similarity coefficient algorithm for the design of manufacturing cells. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 8, pp. 1757-1766.
- McAULEY, J. (1972). Machine grouping for efficient production. The Production Engineer, vol. 51, no. 2, pp. 53-57.
- McCORMICK, W. T. Jr., SCHWEITZER, P. J., WHITE, T. W. (1972). Problem decomposition and data reorganization by clustering techniques. Operations Research, vol. 20, pp. 993-1009.
- MURTHY, V. R., SRINIVASAN, G. (1995). Fractional cell formation in group technology. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 5, pp. 1323-1337.
- RAJAGOPALAN, R., BATRA, J. L. (1975). Design of cellular production systems : a graph-theoretic approach. International Journal of Production Research, vol. 13, no. 6, pp. 567-579.

RAJAMANI, D., SINGH, N., ANEJA, Y. P. (1992). A model for cell formation in manufacturing systems with sequence dependence. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 6, pp. 1227-1235.

SARKER, B. R., YU, J. (1994). A two-phase procedure for duplicating bottleneck machines in a linear layout, cellular manufacturing system. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 9, pp. 2049-2066.

SEIFODDINI, H., HSU, C.-P. (1994). Comparative study of similarity coefficients and clustering algorithms in cellular manufacturing. Journal of Manufacturing Systems, vol. 13, no. 2, pp. 119-127.

SHIKO, G. (1992). A process planning-orientated approach to part family formation problem in group technology applications. International Journal of Production Research, vol. 30, no. 8, pp. 1739-1752.

SHTUB, A. (1989). Modelling group technology cell formation as a generalized assignment problem. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 5, pp. 775-782.

SRINIVASAN, G., NARENDRAN, T. T., MAHADEVAN, B. (1990). An assignment model for the part-families problem in group technology. International Journal of Production Research, vol. 28, no. 1, pp. 145-152.

SRINIVASAN, G., NARENDRAN, T. T. (1991). GRAFICS - a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 3, pp. 463-478.

SULE, D. R. (1991). Machine capacity planning in group technology. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 9, pp. 1909-1922.

SURESH, N. C., SLOMP, J., KAPARTHI, S. (1995). The capacitated cell formation problem : a new hierarchical methodology. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 6, pp. 1761-1784.

VANNELLI, A., KUMAR, K. R. (1986). A method for finding minimal bottleneck cells for grouping part-machine families. International Journal of Production Research, vol. 24, no. 2, pp. 387-400.

VANNELLI, A., HALL, R. G. (1993). An eigenvector solution methodology for finding part-machine families. International Journal of Production Research, vol. 31, no. 2, pp. 325-349.

VENUGOPAL, V., NARENDRAN, T. T. (1994). Machine-cell formation through neural network models. International Journal of Production Research, vol. 32, no. 9, pp. 2105-2116.

VERMA, P., DING, F.-Y. (1995). A sequence-based materials flows procedure for designing manufacturing cells. International Journal of Production Research, vol. 33, no. 12, pp. 3267-3281.

WAGHODEKAR, P. H., SAHU, S. (1984). Machine-component cell formation in group technology: MACE. International Journal of Production Research, vol. 22, no. 6, pp. 937-948.

WEI, J. C., KERN, G. M. (1989). Commonality analysis : a linear cell clustering algorithm for group technology. International Journal of Production Research, vol. 27, no. 12, pp. 2053-2062.

BIBLIOGRAPHIE

ASKIN, R. G., CRESSWELL, S. H., GOLDBERG, J. B., VAKHARIA, A. J. (1991). A hamiltonian path approach to reordering the part-machine matrix for cellular manufacturing. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 6, pp. 1081-1100.

FRAZIER, G. V., GAITHER, N. (1991). Seed procedures for cell formation heuristics. International Journal of Production Research, vol. 29, no. 11, pp. 2227-2237.

SEIFODDINI, H., DJASSEMI, M. (1996). A new grouping measures for evaluation of machine-component matrices. International Journal of Production Research, vol. 34, no. 5, pp. 1179-1193.

ANNEXE 6

DESCRIPTION DU CAS À L'ÉTUDE À LA SECTION 5.4. ANALYSE D'UN CAS

L'implantation initiale est de type par processus opératoires. Les produits suivants sont qualifiés de représentatif de leur famille respective de produits. Un convoyeur est utilisé pour la manutention dans les départements B13, B14 et B15. Les départements considérés à position fixe sont : A12, A13, B13, B14, B15, C10 et D1. Tous les équipements de production fonctionnent de façon unitaire à l'exception du four (D1) qui procède par lot de 16 paniers comportant chacun 20 pièces et avec un temps de cuisson de 40 minutes.

Nomenclature des pièces :

P1	-	#1346602	-	Front disc
P2	-	#1346603	-	Rear disc
P3	-	#1346604	-	Small disc
P4	-	#1346605	-	Large disc
P5	-	#1304289	-	Front disc
P6	-	#1304290	-	Rear disc
P7	-	#1314619	-	Disc
P8	-	#1319633	-	Weight assembly
P9	-	#1346618	-	Weight assembly
P10	-	#1334997	-	Flange
P11	-	#1338176	-	Sleeve
P12	-	#1338171	-	Flange assembly
P13	-	#1319697	-	Spring
P14	-	#1319693	-	Spring assembly
P15	-	#1343666	-	Fan pulley
P16	-	#1346288	-	Oil pump pelley

- P17 - #104083 - Rivets
- P18 - #1346315 - Pin
- P19 - #1346619 - Harmonic balancer assembly
- P20 - #1342427 - Balancer assembly

Nomenclature des équipements de manutention :

- MH1 - Truck ACME lines
- MH2 - Truck Harris lines
- MH3 - Stock handler (à destination et en provenance de B3)
- MH4 - Local material handling personnel (à destination et en provenance de B3)
- MH5 - Assembly conveyor (en provenance de B13 à destination de B15)

Nomenclature des équipements de production :

- | | | |
|-----|----------|--|
| 4 x | A1 | Assembly area (Dake hydraulic press) |
| 4 x | A2 | Assembly area (American hydraulic press) |
| 6 x | A3 | 57 ½ Toledo press |
| 6 x | A4 | No. 29 Blister press |
| 5 x | A5 | No. 30 Bliss press |
| 6 x | A6 | Clearing press |
| 4 x | A7 | Ferreclite press |
| 2 x | A8 | No. 77 Toledo press |
| 2 x | A9 / A10 | No. 77 Toledo press |
| 4 x | A11 | No. 77 Toledo press |
| 4 x | A12 | Niagara shear |
| 4 x | A13 | Plater |
| | B3 | Weight assembly storage area |
| 3 x | B5 | No. 56 Toledo press |

2 x	B7	US buffer #100
2 x	B8	US buffer #100
2 x	B9	Final assembly (bench)
2 x	B10	Final assembly
1 x	B11	Grant riveter
1 x	B12	Grant riveter
4 x	B13	Grant riveter
	B15	Receiving / Shipping
4 x	C2	Hammond No. 50 Polisher
6 x	C3	Landis No. 630 Grinder
4 x	C5	Oil gear horizontal broach
2 x	C6a	Avey 2 spindle drill press
1 x	C6b	Oil gear vertical broach
1 x	C6c	Sunstand stub lathe
1 x	C6d	Lapointe horizontal broach
4 x	C9	Bench
1 x	C10	Yoder roll splitter
4 x	D1	Holcroft furnace
4 x	D2 / D8	Baird tumbler
3 x	D4 / D10 / D12	Spring assembly area (Dake hydraulic press)
3 x	D11 / D13 / D14	V and O press

Tableau A6.1 Renseignements complémentaires pour divers postes¹

VARIABLES	PRODUCTION			
	A10	A12	B13	C10
Tdisp (m)	8 heures de travail par équipement			
Tacc (p,f,o,m)	négligeable			
%Ths (m)	3 %	4 %	2 %	2 %

¹ Les autres équipements ont des valeurs nulles

La figure suivante présente les manutentions des produits P10 et P10a pour le scénario 1.

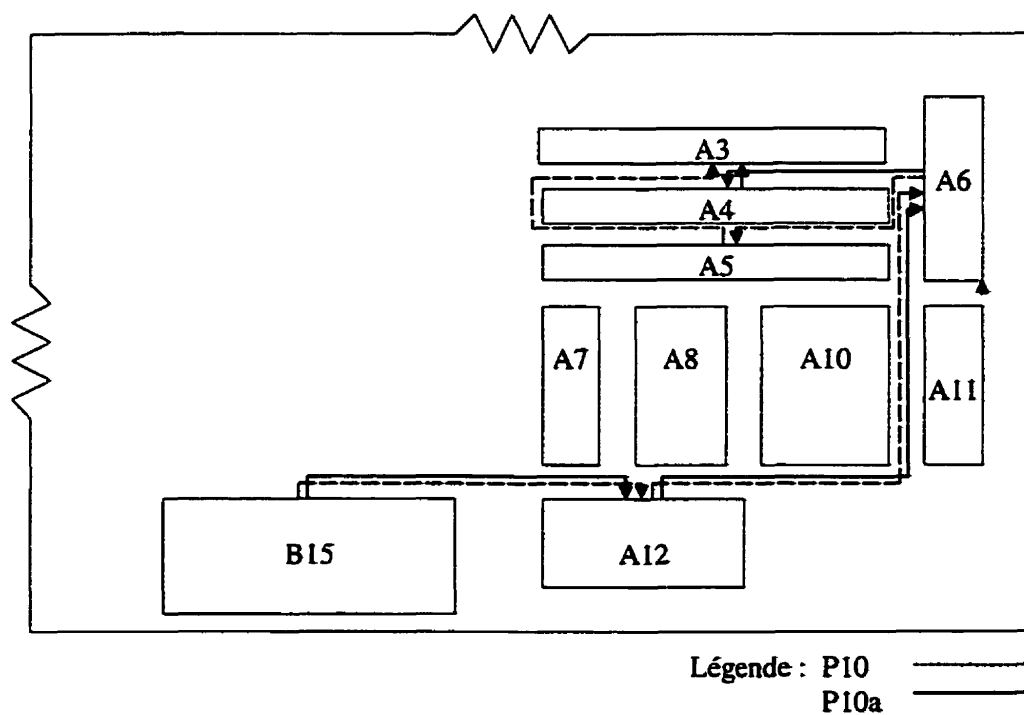
**Figure A6.1 Implantation partielle et circulation des produits P10 et P10a**

Tableau A6.2 Tableau multi-produits de la séquence des opérations et du nombre de déplacements par jour (8 heures)

	PRODUITS																			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
B15																				
A12																				
C10																				
A13																				
A1																				
B12																				
A4																				
A4																				
D11																				
A11																				
A11																				
B11																				
A10																				
A8																				
D2																				
D4																				
B3																				
B5																				
C5																				
B8																				
B10																				
B7																				
B9																				

Tableau A6.2 Tableau multi-produits de la séquence des opérations et du nombre de déplacements par jour
(8 heures) (suite)

	PRODUITS																			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
A2																				
B13																				
A6																				
A5																				
A5																				
A5																				
A5																				
A3																				
A3																				
A3																				
D1																				
C9																				
C9																				
C6a																				
C6b																				
C6c																				
C6d																				
A7																				
C3																				
C2																				

Tableau A6.3 Tableau multi-produits de la quantité fabriquée par jour (8 heures)

	PRODUITS																			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
B15																				
A12																				
C10																				
A13																				
A1																				
B12																				
A4																				
A4																				
D11																				
A11																				
A11																				
B11																				
A10																				
A8																				
D2																				
D4																				
B3																				
B5																				
C5																				
B8																				
B10																				
B7																				
B9																				
A2																				
B13																				
A6																				

Tableau A6.3 Tableau multi-produits de la quantité fabriquée par jour (8 heures) (suite)

	PRODUITS																			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
A5																				
A5																				
A5																				
A5																				
A3																				
A3																				
A3																				
D1																				
C9																				
C9																				
C6a																				
C6b																				
C6c																				
C6d																				
A7																				
C3																				
C2																				

M = millions

Tableau A6.4 Tableau multi-produits des temps unitaires d'opération (secondes par pièce intrant) (suite)

	PRODUITS																			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
A5																				
A5																				
A5																				
A5																				
A3																				
A3																				
A3																				
D1																				
C9																				
C9																				
C6a																				
C6b																				
C6c																				
C6d																				
A7																				
C3																				
C2																				

¹ temps par pièce assemblée

² par lot de 320 pièces (16 paniers de 20 pièces chacun)

Tableau A7.1 Valeurs pour le référentiel (suite)

IND5 - RATIO DE DISTANCE

$$\sum_i \sum_j \text{dist}^*(i, j) * \text{procédé}(\alpha, \beta, i, j)$$

P1	516		P8	616		P15	464
P2	516		P9	564		P16	489
P3	810		P10	649		P17	260
P4	730		P11	476		P18	352
P5	580		P12	2 038		P19	1 186
P6	498		P13	656		P20	1 080
P7	656		P14	334			

IND8 - RATIO D'ENGORGEMENT

densité*(θ) =

$$\sum_f \sum_p \sum_o \sum_i \sum_j D^*(i, j) * UC^*(p, f, o, i) * \text{procédé}^*(p, f, i, j)$$

Voir les détails des calculs au tableau A7.2

S1	6 500	S2	12 945	S3	5 442	S4	2 350
----	-------	----	--------	----	-------	----	-------

Tableau A7.2 Calculs¹ des densités référentielles, par segments d'allée

	S1	S2	S3	S4
P1 et P2	0	27* (6+12) = 486	0	0
P3, P4, P5, P6 et P7	0	54* (12+10+2+2+11) = 1 998	0	0
P8 et P9	0	0	0	0
P10	0	27* (90) = 2 430	0	0
P11	0	27* (4) = 108	0	0
P12	14* (46) = 644	0	6* (46)+18* (46) = 1 104	50* (46) = 2 300
P13 @ P17	0	0	0	0
P18	60* (1) = 60	57* (1) = 57	60* (1) = 60	50* (1) = 50
P19 et P20	60* (26+20)+ 33* (26+20)+ 33* (26+20) = 5 796	57* (26+20)+ 57* (26+20)+ 57* (26+20) = 7 866	33* (26+20)+ 60* (26+20) = 4 278	0
densité*(θ)²	6 500	12 945	5 442	2 350

¹ le premier nombre d'une multiplication : distance à parcourir en pieds

entre parenthèse : unités de charge à manutentionner/jour

² unités de charge * pieds/jour

Tableau A7.3 Valeurs¹ des bornes inférieures et supérieures, par indicateurs

	IND1(α)		IND2(α)		IND5(α)	
	INF.	SUP.	INF.	SUP.	INF.	SUP.
P10	-0,2256	+0,1608	0	0	$-\infty$	+0,10
P12	-0,0184	+0,0188	0	0	$-\infty$	+0,10
P14	-0,0980	+0,0780	0	0	$-\infty$	+0,10
P19	-0,1936	+0,1904	0	0	$-\infty$	+0,10
P20	-0,1939	+0,1944	0	0	$-\infty$	+0,10
IND3(EM)			<div>¹ Indicateur #1 : variation permise de $\pm 20 \%$ de la quantité à fabriquer</div> <div>Indicateur #3 : valeurs admissibles du pourcentage d'utilisation actuel incluses dans l'intervalle de 0,40 à 0,95</div> <div>Indicateur #5 : valeurs admissibles inférieures ou égales à 0,10</div> <div>Indicateur #8 : valeurs admissibles inférieures ou égales à 0,10</div> <div>IND1 - Ratio de quantité à fabriquer</div> <div>IND2 - Ratio de procédé de fabrication</div> <div>IND3 - Taux de fonctionnement</div> <div>IND5 - Ratio de distance</div> <div>IND8 - Ratio d'engorgement</div>			
A2	-0,44	+0,11				
A3	-0,47	+0,09				
A4	h.b.	+0,57				
A5	-0,33	+0,22				
A12	-0,19	+0,36				
B5	-0,56	h.b.				
B13	-0,40	+0,15				
C6a	-0,54	+0,01				
C6b	-0,54	+0,01				
C6c	-0,54	+0,01				
C6d	-0,54	+0,01				
D1	-0,50	+0,05				
IND8(θ)						
S1	$-\infty$	+0,10				
S2	$-\infty$	+0,10				
S3	$-\infty$	+0,10				
S4	$-\infty$	+0,10				

Tableau A7.4 Calculs et résultats pour les indicateurs sélectionnés, scénarios 1 et 2

SCÉNARIO 1		SCÉNARIO 2		
		- 20 %	+ 10 %	+ 20 %
IND1 - Ratio de quantité à fabriquer				
P10	$\frac{0/194\,526}{0,0017} - 1$ = -1			
P10a		$\frac{320*0,8/(194\,462)}{0,0017} - 1$ = -0,2022	$\frac{320*1,1/(194\,558)}{0,0017} - 1$ = +0,0965	$\frac{320*1,2/(194\,590)}{0,0017} - 1$ = +0,1960
P12	0	$\frac{13\,600/(194\,462)}{0,0700} - 1$ = +0,0004	$\frac{13\,600/(194\,558)}{0,0700} - 1$ = -0,0001	$\frac{13\,600/(194\,590)}{0,0700} - 1$ = -0,0003
P14	0	$\frac{0,11M/(194\,462)}{0,5655} - 1$ = +0,0003	$\frac{0,11M/(194\,558)}{0,5655} - 1$ = -0,0002	$\frac{0,11M/(194\,590)}{0,5655} - 1$ = -0,0004
P19	0	$\frac{7\,800/(194\,462)}{0,0401} - 1$ = +0,0003	$\frac{7\,800/(194\,558)}{0,0401} - 1$ = -0,0002	$\frac{7\,800/(194\,590)}{0,0401} - 1$ = -0,0004
P20	0	$\frac{6\,000/(194\,462)}{0,0308} - 1$ = +0,0005	$\frac{6\,000/(194\,558)}{0,0308} - 1$ = +0,0001	$\frac{6\,000/(194\,590)}{0,03084} - 1$ = +0,0002
IND2 - Ratio de procédé de fabrication				
P10	$0+0+0+1+1+1+1$ = 5			
P10a		0	0	0
P12	0	0	0	0
P14	0	0	0	0
P19	0	0	0	0
P20	0	0	0	0
IND3 - Taux de fonctionnement				
A2	0	0	0	0
A3	0	0	0	0
A4		$\frac{[(840*10+5000*8+1680*10+13800*0,8*(4+2))/(6*28800)] - 0,86}{-0,86}$ = -0,10	$\frac{[(840*10+5000*8+1680*10+13800*1,1*(4+2))/(6*28800)] - 0,86}{-0,86}$ = +0,04	$\frac{[(840*10+5000*8+1680*10+13800*1,2*(4+2))/(6*28800)] - 0,86}{-0,86}$ = +0,09
A5	$\frac{3200*2,5}{(5*28\,800-0)} - 0,73$ = -0,67			
A12	0	$\frac{[(120*50+240*70+200*50+200*50+320*0,8*55+80*75)/(4*28800-0,04*62880)] - 0,59}{-0,59}$ = -0,03	$\frac{[(120*50+240*70+200*50+200*50+320*1,1*55+80*75)/(4*28800-0,04*68160)] - 0,59}{-0,59}$ = +0,02	$\frac{[(120*50+240*70+200*50+200*50+320*1,2*55+80*75)/(4*28800-0,04*69920)] - 0,59}{-0,59}$ = +0,03
B5	0	0	0	0

Tableau A7.4 Calculs et résultats pour les indicateurs sélectionnés, scénarios 1 et 2 (suite)

SCÉNARIO 1		SCÉNARIO 2		
		- 20 %	+ 10 %	+ 20 %
IND3 - Taux de fonctionnement				
B13	0	0	0	0
C6a	0	0	0	0
C6b	0	0	0	0
C6c	0	0	0	0
C6d	0	0	0	0
D1	0	0	0	0
IND5 - Ratio de distance				
P10	$\frac{0}{126+275+110+138} - 1$ = -1,00			
P10a		$\frac{126+275+85+30}{126+275+85+30} - 1$ = 0,00	0	0
P12	0	0	0	0
P14	0	0	0	0
P19	0	0	0	0
P20	0	0	0	0
IND8 - Ratio d'engorgement				
S1	$\frac{6500}{6500} - 1$ = 0,00	0	0	0
S2	$\frac{[12945-(27+0)*90]}{12945} - 1$ = -0,19	$\frac{10515}{10515} - 1$ = 0,00	0	0
S3	$\frac{5442}{5442} - 1$ = 0,00	0	0	0
S4	$\frac{2350}{2350} - 1$ = 0,00	0	0	0

Tableau A7.5 Calculs et résultats pour les indicateurs sélectionnés, scénarios 3, 4 et 5

	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5
IND1 - Ratio de quantité à fabriquer			
P10			
P10a	+0,0965	+0,0965	$\frac{352*0,8/(194\ 558)}{0,0017} - 1$ = -0,1486
P12	-0,0001	-0,0001	-0,0001
P14	-0,0002	-0,0002	-0,0002
P19	-0,0002	-0,0002	-0,0002
P20	+0,0001	+0,0001	+0,0001
IND2 - Ratio de procédé de fabrication			
P10	0	0	0
P10a	0	0	0
P12	0	0	0
P14	0	0	0
P19	0	0	0
P20	0	0	0
IND3 - Taux de fonctionnement			
A2	0	0	0
A3	$\frac{13600*(4+4+3)}{(7*28\ 800-0)} - 0,87$ = -0,13	$\frac{13600*(4+4+3)}{(6*28\ 800-0,12*149600)} - 0,74$ = +0,23	+0,23
A4	+0,04	+0,04	$\frac{[840*10+5000*8+1680*10+15\ 180*0,8*(4+2)]}{(6*28800)} - 0,86$ = -0,06
A5			
A12	$\frac{[120*50+240*70+200*50+200*50+352*55+80*75]}{(4*28800-0,04*68160)} - 0,59$ = +0,02	$\frac{[120*50+240*70+200*50+200*50+352*55+80*75]}{(4*28800-0,09*68160)} - 0,59$ = +0,03	$\frac{[120*50+240*70+200*50+200*50+352*0,8*55+80*75]}{(4*28800-0,09*49082)} - 0,59$ = -0,15
B5	0	0	0
B13	0	0	0
C6a	0	0	0
C6b	0	0	0
C6c	0	0	0
C6d	0	0	0
D1	0	0	0

Tableau A7.5 Calculs et résultats pour les indicateurs sélectionnés, scénarios 3, 4 et 5 (suite)

	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5
IND5 - Ratio de distance			
P10			
P10a	$\frac{126+275+85+30*6/7+85*1/7 - 1}{126+275+85+30}$ = +0,02	$\frac{126+275+85+30*5/6+85*1/6 - 1}{524}$ ≈ +0,00	$\frac{126+275+85+30*5/6+85*1/6 - 1}{524}$ ≈ +0,00
P12	$\frac{[(375*2)*6/7+(290*2)*1/7+285*6/7+215*1/7+290+248+45+260]}{[375*2+285+290+248+45+260]} - 1$ = -0,02	$\frac{[(375*2)*5/6+(290*2)*1/6+285*5/6+215*1/6+290+248+45+260]}{1844} - 1$ ≈ -0,01	$\frac{[(375*2)*5/6+(290*2)*1/6+285*5/6+215*1/6+290+248+45+260]}{1844} - 1$ ≈ -0,01
P14	0	0	0
P19	0	0	0
P20	0	0	0
IND8 - Ratio d'engorgement¹			
S1	$\frac{[14*(46)*6/7+60*(46)*1/7+60+5796]}{6500} - 1$ = +0,05	$\frac{[14*(46)*5/6+60*(46)*1/6+60+5796]}{6802} - 1$ = +0,01	$\frac{6853}{6802} - 1$ = +0,01
S2	$\frac{[486+1998+27*6/7*(4)+14*1/7*(4)+14*(68*2)*1/7+14*(46)*1/7+57+7866]}{10515} - 1$ = +0,03	$\frac{[486+1998+27*5/6*(4)+14*1/6*(4)+14*(68*2)*1/6+14*(46)*1/6+57+7866]}{10872} - 1$ = +0,01	$\frac{[10931+57*(90*0,2)]}{10872} - 1$ = +0,10
S3	$\frac{5442}{5442} - 1$ = 0,00	0	$\frac{[5442+60*(90*0,2)]}{5442} - 1$ = +0,20
S4	$\frac{2350}{2350} - 1$ = 0,00	0	$\frac{[2350+50*(90*0,2)]}{2350} - 1$ = +0,38

¹ le premier nombre d'une multiplication : distance à parcourir en pieds
entre parenthèse : unités de charge à manutentionner/jour

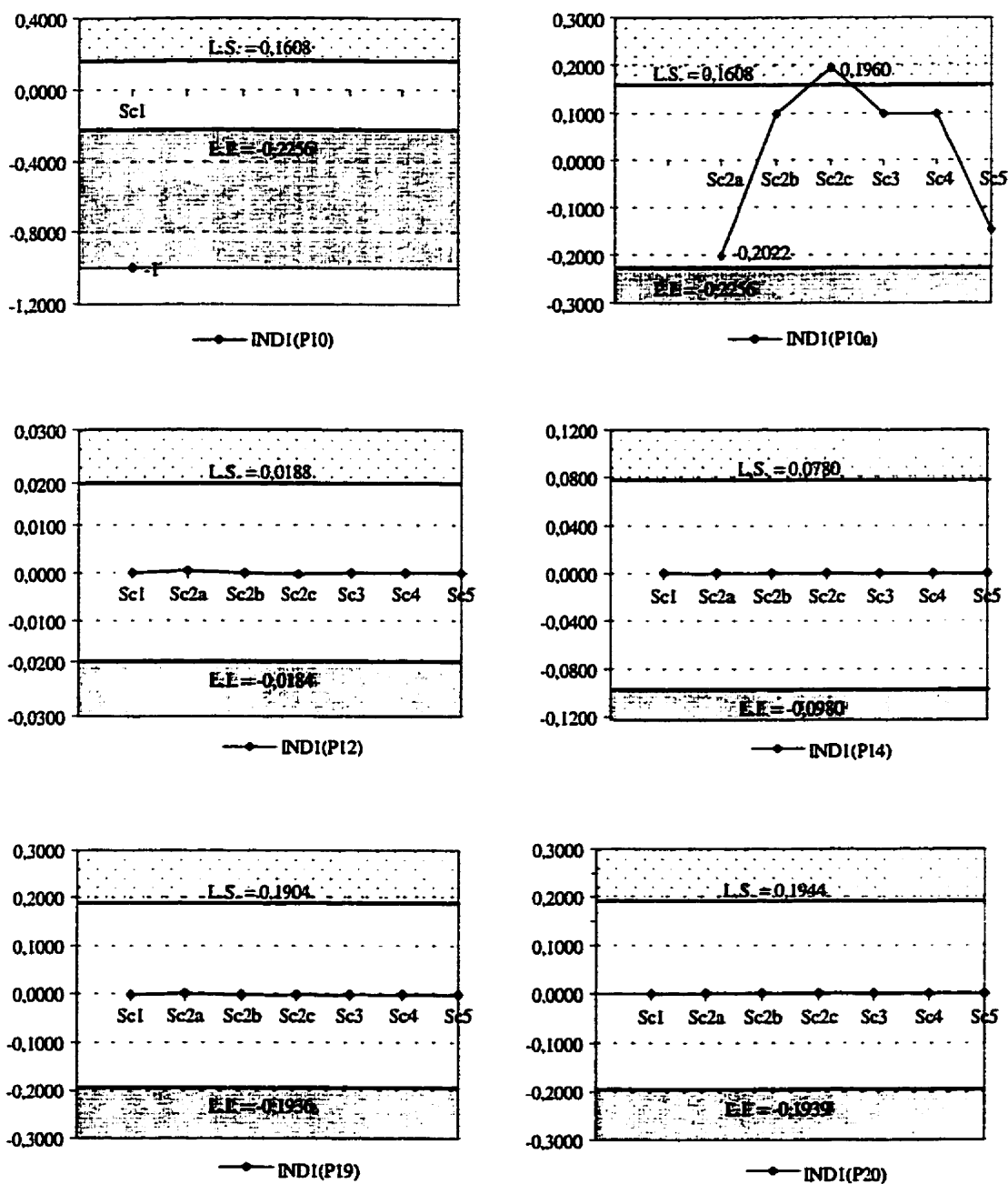


Figure A7.1 Résultats pour les indicateurs 1, Ratio de quantité à fabriquer

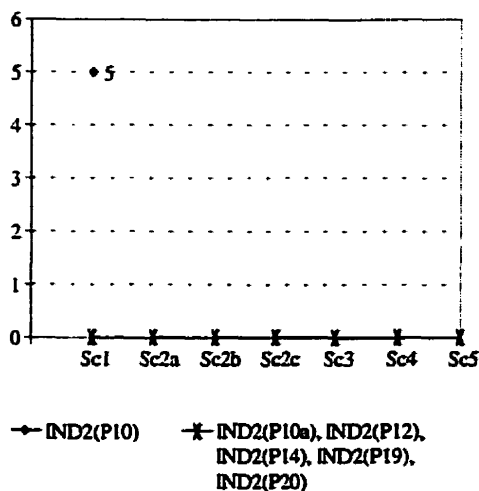


Figure A7.2 Résultats pour les indicateurs 2, Ratio de procédé de fabrication

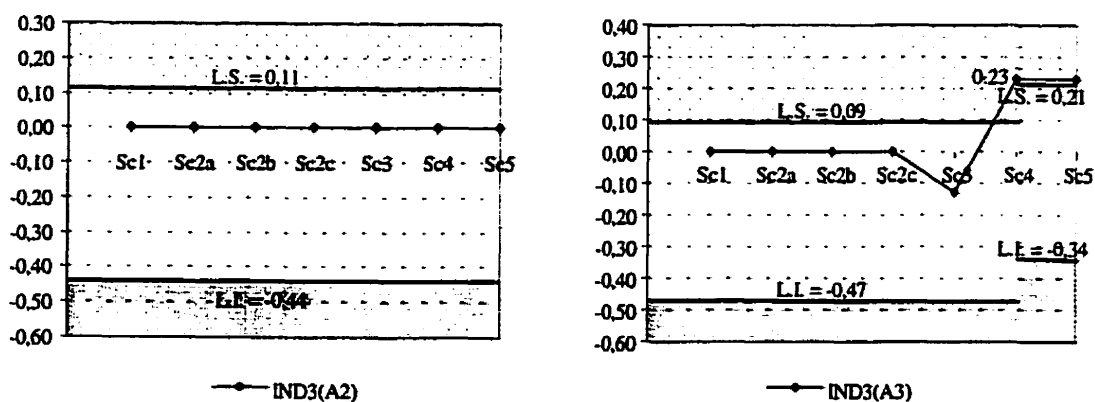


Figure A7.3 Résultats pour les indicateurs 3, Taux de fonctionnement

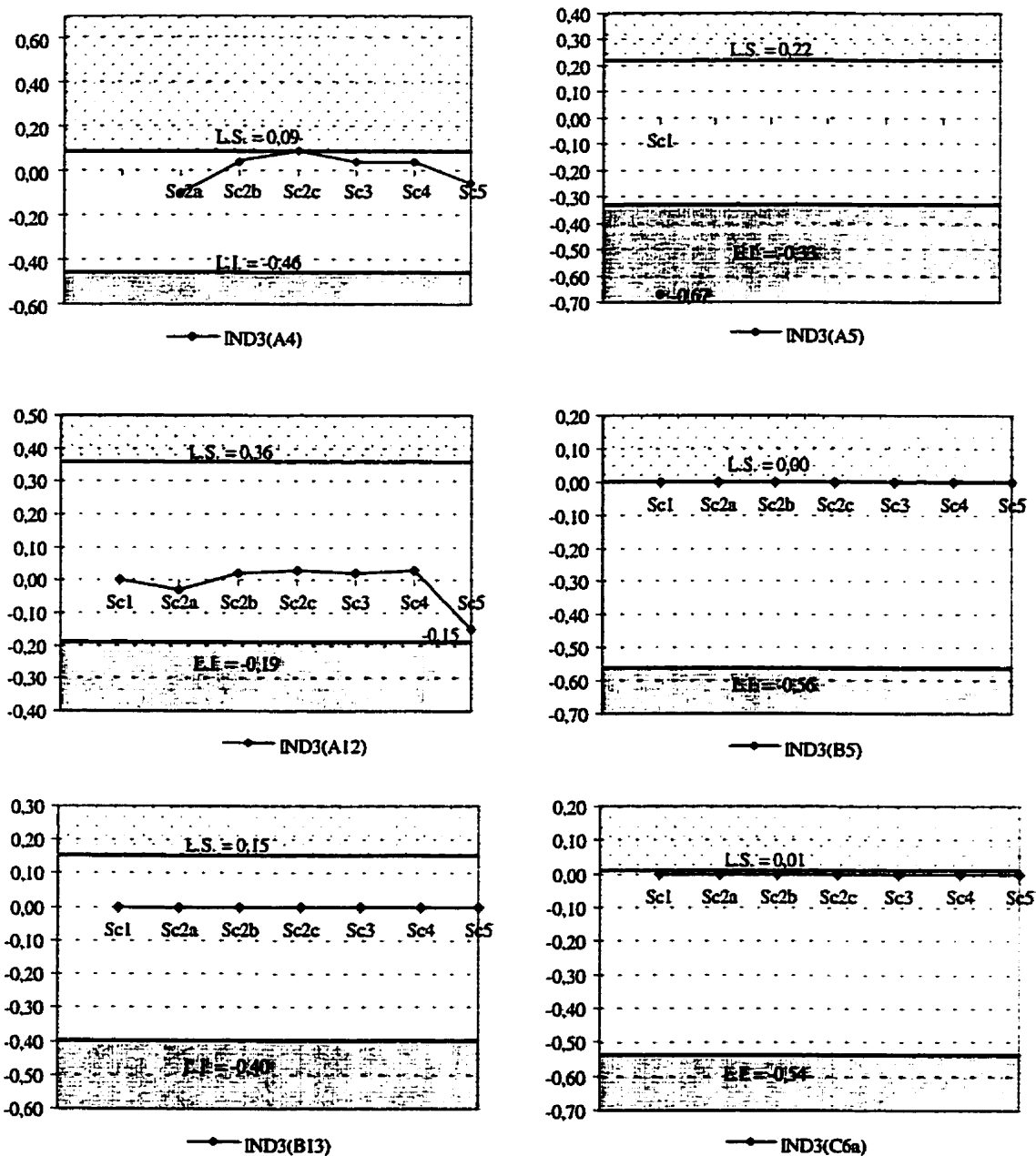


Figure A7.3 Résultats pour les indicateurs 3, Taux de fonctionnement (suite)

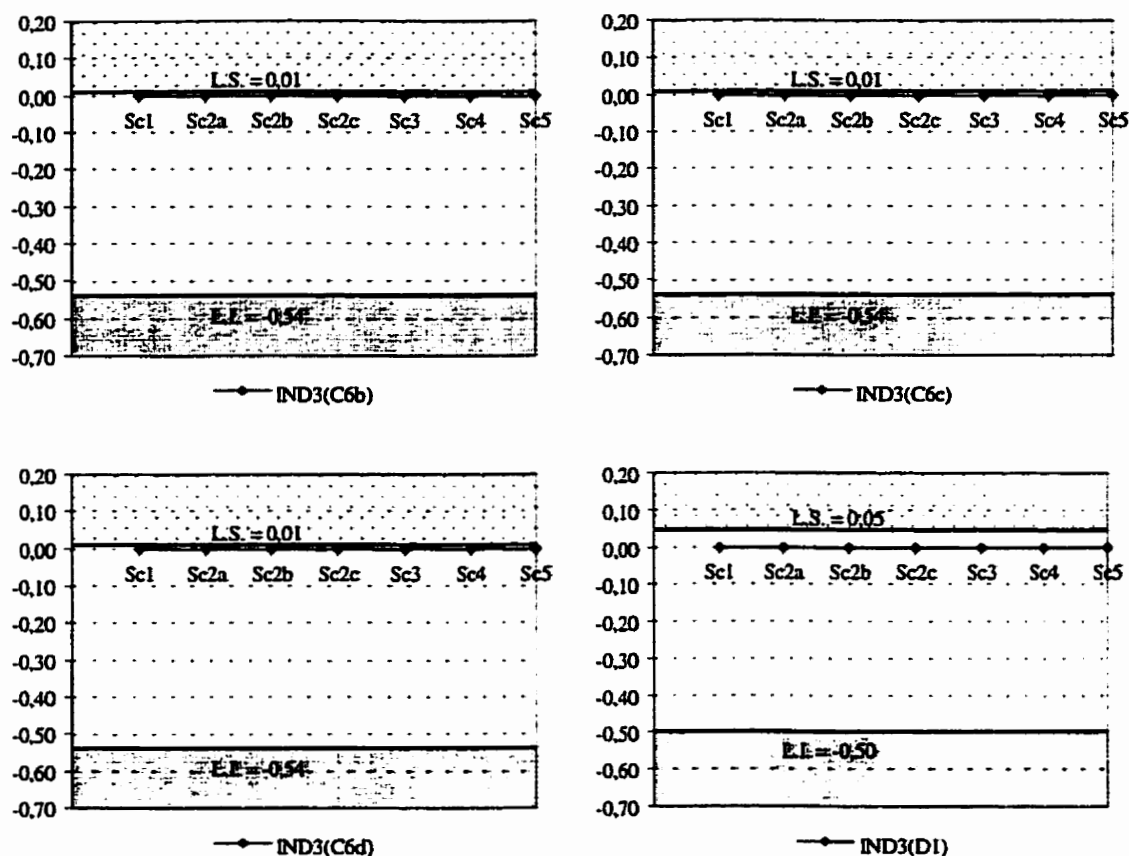


Figure A7.3 Résultats pour les indicateurs 3, Taux de fonctionnement (suite)

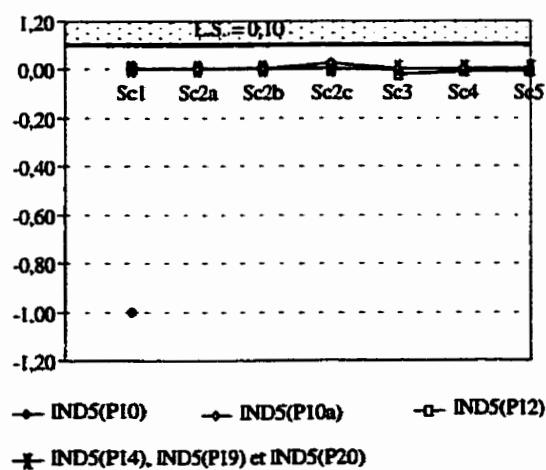


Figure A7.4 Résultats pour les indicateurs 5, Ratio de distance

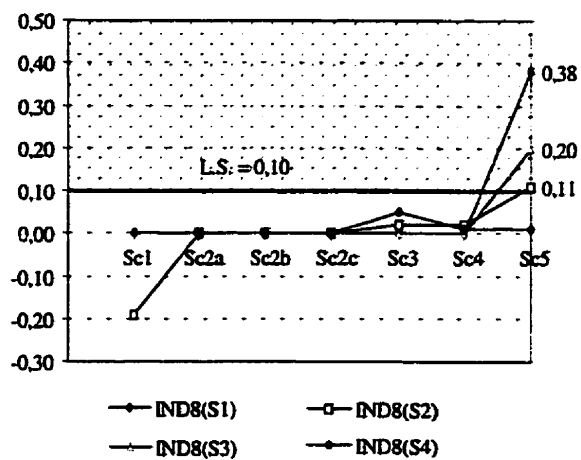


Figure A7.5 Résultats pour les indicateurs 8, Ratio d'engorgement

ANNEXE 8
DONNÉES DE BASE RELATIVES À L'ENQUÊTE TYPE-FORME

Dans les commentaires :

informations du CRIQ

"Données du Répertoire des produits disponibles au Québec",

1991 - vol. 2,

1992 - vol. 2,

1993 - vol. 2,

1994 - vol. 2,

1995 - vol. 2,

1996 - vol. 2,

1997 - vol. 3 et 4,

1998 - vol. 5.

Légende utilisée

:

type de fabrication (Fab.) :

s = standard

p = personnalisée

type d'implantation (Type) :

pc = par procédés

pd = par produits

f = par familles de produits

Tableau A8.1 Données de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France






#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
E01	cadres pour exposition murale	s/p	pc		
E02	usinage, production de mâts pour réacteurs	s	pd/pc	magasin 	par produits => chaque ligne par procédés 4000 empl total
E03	parties électriques des locomotives et engins de traction	s	f	nil	système JIT 1280 empl. / 40000 total 78 700 m ² pour l'entreprise
E04	applications mécaniques et robinetterie industrielle	s	pc	dépts 	unité flexible de production pour lot de faible qté CA=405MF 470 empl. / 300 en prod.
E05	militaire : artillerie, tourelle de char, obus, ...	s	f/pc	nil	2700 empl.
E06	injection et galvanoplastie pour haute parfumerie	p	pc	dépts 	flux bi- 191 empl./ 150 en prod. +70-80 stagiaires et ss-contrats 10 300 m ²
E07	fab. de pièces de caoutchouc	s	pc/f	nil	uni-directionnel 94 empl. / 84 en prod. 23000m ² CA=57MF
E08	portes d'armoires de cuisine	s		nil	50 empl. CA=1.3Mpounds
E09	fab de prothèses médicales et pièces pour aérospatial (1-10 pièces/commande)	p	pc	mach 	* : C.Q. 33 empl. / 30 en prod. 1000m ² CA=12MF

Tableau A8.1 Données de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France (suite)






#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
E10	céramique d'art (pâte moulée) et technique (poudre compressée)		f		flux uni- CA=6MF
E11	conception et fab. de trépan et couronnes diamantées pour forage de type pétrolier		pc		31 empl.
E12	prod. de boyau collagène	s	pc	nil	conditionnement en S pc : de façon globale
E13	console de simulation de la navigation, pour pc	s	pd	mach 	1 seul produit 5 en prod.
E14	ss-traitance en fonderie d'alliage d'Al et alliage cuivreux et en usinage	p	pc	nil	petites et moyennes séries 400 empl. CA=157MF
E15	fab. de produits diététiques, liquide et poudreux	s	pc	dépts 	11 empl. 2500 m ²
E16	recherche dans le domaine de la vision, reconnaissance de formes			par cellule, pour atelier d'usinage	entreprise de service +100 empl.
E17	département de prép. de tôles élémentaires	s	pd/pc	mach 	le flux général = gauche à droite 250m x 30m
E18	produits chimiques			prod. en continu	
E19				nil	entreprise de service 15 empl.
E20	métallurgie des poudres et fab. d'outils coupants	s & p	pc	nil	300 empl./ 220 en prod. CA=80MF

Tableau A8.1 Données de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France (suite)








#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
E21	abattoir, découpe, compostage et expédition	s	pd	nil	1 seul produit = les poulets production à la chaîne 210 empl. CA=300MF
E22	fab. de menuiseries intérieures et ext. (fenêtres, portes-fenêtres, volets, ...)	s	f		mach. 58 empl. / 49 en prod.
E23	prod. de boîtiers d'allumage		pc		
E24	transformation de tabac	s	pd	nil	65 empl. / 57 en prod
E25	ss-traitance pour pièces d'aviation - train d'atterrissage et freins	s	f		970 empl.
E26	étude, fab. et vente de turbine à gaz atelier de chaudronnerie	s/p	cell (pc)	ilôts de fab 	ilôts de fab où 1 îlot = 1 activité = +ieurs machines ex. montage 28900m ² petites séries, prototypes / 429 empl. CA=375MF
E27	fab. métallique prod. en série de mobilier tubulaire	s	pc		50 empl. CA=27MF
E28	ss-traitance en aéronautique (1-10 pièces/commande)	p	pc		* : isolation de peinture / soudure 70 empl. / 54 en prod. 2e étage = bureau et stockage
E29	dév. et maintenance de logiciels, conception et réalisation			nil	petites séries 38 empl. CA=17,8MF
E30	frittage (petites pièces) métallurgie des poudres	s / p	pd/ pc		130 empl. / 75 en prod. CA=81,7MF frittage = ligne 5770 m ² fab. de matrices = par procédés

Tableau A8.1 Données de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, France (suite)



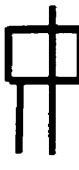



#	Activité	Fab. s / p	Type	Implantation	Commentaires
E30a	frittage		pd		
E30b	fab. de matrices	p	pc		~12% de l'espace incluant entreposage et couloirs
E31	fab. aéronautique - atelier de peinture pour avions			nil	934 empl. / 410 en prod.
E32	confection de vestes et pantalons pour hommes	s		nil	510 empl./360 en prod. / 310 en mo directe
E33	fab. vente et installation de matériel d'irrigation	s	pc		49 empl. CA=18MF 185m x 36.6m
E34	matériel de distrib. et de sectionneurs haute-tension et forte intensité	s	pc		545 empl. / 240 en prod. CA=445MF
E35	fab. d'aiguilles médicales pour suture	s	pc	 * **	* : lavage par ultrason ** : C.Q. - de 50 empl
E36	nil			nil	flux continu, 113 empl., CA=93MF
E37	turbines à gaz de petites et moyennes puissance	s	cell (f)	îlots de fab	1450 empl. / 1025 en prod.
E37		s	f/pc		atelier de carters = par famille 50 en prod
E37		s			atelier d'engrenages 71 empl. / 64 en prod.

Tableau A8.2 Données de l'École Polytechnique de Montréal, Canada










#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
P01	fab. de coussins, oreillers, ...	s	pd	dépits * 	* : bureaux, entrepôt, cafétéria ~ type M <u>43/40 en prod</u>
P02	meublier de bureau	s	pd	dépits 	* : de haut en bas : four, séchoir, peinture, laveuse 270pi x 180pi <u>154/128 en prod</u>
P03	fab. de mobilier tubulaire de métal	s	pc	mach 	20 en prod 89.4pi x 58.3pi
P04	pièces d'aéronautique	s	pc	mach. * 	* : dépits de contrôle et services le long de cette allée 19275pi² <u>55/35 en prod</u>
P05	usine d'assemblage	s	pd	dépits 	~22000 m² <u>1112/568 en prod</u>
P06	fab. véhicules d'hiver : damage pour centres de ski et utilitaires municipaux	s	pc	pour le dépt. de peinture : mach 	96 en prod. <u>185/125 en prod</u>
P07	fab. de chaussettes	s	pc	dépits 	* : services et bureau 125pi x 150pi <u>45 en prod</u>
P08	boulangerie	s	pd	mach. 	convoyeurs ~120pi x 120pi <u>28/24 en prod</u>
P09	boissons gazeuses	s	pc/pd	dépits quais **  MP services	50 empl. / 27 en prod. remplissage = lignes * : produits finis <u>40/20 en prod.</u>

Tableau A8.2 Données de l'École Polytechnique de Montréal, Canada (suite)



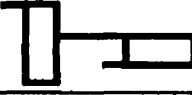





#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
P10	fab. sacs de couchage et vêtements de flottaison	s	pc	dépts 	* : bureaux sur toute la queue 70000pi ²
P11	fab. armoires de cuisine et ameublement commercial et industriel	s	pc	mach. 	<u>42/29 en prod</u>
P12	transformation du fil métallique	s	pc	dépts 	38410 pi ² <u>98/89 en prod</u>
P13	fab. de filtres à air	s	cell	cellules 	~800m ² <u>20/16 en prod</u>
P14	fab. de pièces de zinc	s	f	cellules impl = une partie seulement de la production 	cellules en U + de 400 empl <u>526/444 en prod</u> 50pi x 50pi (<i>une partie seulement</i>)
P15	imprimerie haut de gamme	s	f	mach et dépt. 	* : par dépts bureaux, chambre noire ; par procédés 15.2m x 31m <u>16/7 en prod</u>
P16	conception et fab d'étiquettes de prestige et autres formes d'identification de produits	s/p	pc	dépts 	entrepôt : au centre du I 220pi x 120pi <u>150/110 en prod, CA=10@25M\$</u>
P17	dépt. de confiture et gelée	s	pc	nil	ligne de remplissage = par famille = convoyeurs ce dépt=200pix80pi <u>2389/2164en prod</u>
P18	embouteillage et commercialisation d'eau de source	s	pd		2 lignes de production, de chaque côté de l'allée centrale 150m x ~35m convoyeurs, en continu <u>110/70 en prod en 1994</u>

Tableau A8.2 Données de l'École Polytechnique de Montréal, Canada (suite)


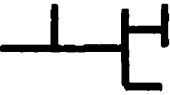











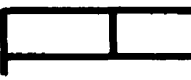

#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
P19	fab. portes et fenêtres	s	pc	dépts 	70-80 empl. en saison forte CA=7M\$ ~200pi x 140pi 74/55 en prod
P20	fab. meubles en frêne massif	s	pc	dépts 	départ. de peinture beaucoup de convoyeurs ~384pi x 180 pi 45/38 en prod
P21	fab équip. de cuisines commerciales	s / p	pc	mach. 	Ca=7M\$ 70/45 en prod
P22	fab. équip. de hockey	s	pc	dépts 	18000 pi ² 102/25 en prod
P23	fab. produits de plastique en moulage soufflé (ex. planches à neige, luge)	s	pc	mach 	entrepôt : au bout droit du I 80pi x 100pi + entrepôt et bureaux 43/40 en prod
P24	fab. lits, tables, buffets, ... en bois et en métal	s	pc	mach 	assemblages sur chaîne de montage avec convoyeur 312pi x 144pi 102/90 en prod
P25	meubles résidentiels en bois aggloméré	s	pc	mach 	fab. sur commande 38 en prod. 20140- pi ² 35/30 en prod
P26	fab. et conditionnement produits de ss-traitance pour cosmétique et pharmaceutique	s	pc	dépts 	- de 40 empl. ~23000pi CA=2.5M\$ 30/24 en prod
P27	fab. produits d'entretien ménager, achat et vente d'articles de nettoyage	s	pc	dépts 	* : entrepôts de mp et produits finis 27/12 en prod

Tableau A8.2 Données de l'École Polytechnique de Montréal, Canada (suite)

#	Activité	Fab.	Type	Implantation	Commentaires
P28	fab. jouets de construction en plastique	s	pd	dépts 	ass. : au centre de l'implantation 1200m ²
P29	panneaux architecturaux en béton pour revêtement extérieur des bâtiments	s	pc	mach 	* : entreposage des mp ** : fab murs et planchers de béton (pont roulant) 13800pi ² 54 empl./quart de travail 80/65 en prod
P30	fab. de présentoirs en fil de métal, en bois ou en plastique	s	pc	dépts 	job-shop 30 empl. 22/16 en prod
P31	prod. étiquettes autocollantes	s	pc	mach 	* : entrepôt de produits toxiques 175pi x 110-pi 33 empl en 1996
P32	dessus et cadre de lave-vaisselle	s	pd	mach 	utilisation de convoyeurs, chaîne 200pi x 100pi 12/10 en prod
P33	fab. et distrib. d'équip. pour traitement de l'air : hottes, échangeur d'air et réc. de chaleur, turbines, ...	s	pc/pd (ass)	dépts 	parc-mach. = métal en feuilles achat des autres composantes et ass. en usine 135pi x 229pi 105/70 en prod

ANNEXE 9

TABLEAUX CROISÉS POUR L'ANALYSE DES RÉSULTATS

DE L'ENQUÊTE TYPE-FORME

Tableau A9.1 Données compilées pour É.N.I. et École Polytechnique de Montréal

	CTI	FAB.	TYPE	IMPLANTATION			TAILLE	DIM. (m ²)	#EMPL. TOTAL /EN PROD	CA (M\$)
E01	3971	s/p	pc		hI	H tronqué/I	ME			
E02	3081	s	pd		I	I	TGE		4000	
E04	3091	s	pc	dépts	I	I	TGE		470/300	106.6
E06	1699	p	pc	dépts	#	complexe	GE	10,300	191/150 +70-80	
E09	3081	p	pc	mach	O	O	PE	1,000	33/30	3.2
E10	3591		f		mO	m(I,O)	PE			1.6
E11	3063		pc		mL	m(L,L)	PE		31	
E13	3321	s	pd	mach	m8	m(8,8)	PE		/5	
E15	1098	s	pc	dépts	mL	m(L,I)	PE	2,500	11	
E17	3022	s	pc	mach	mO	m(O,T)	GE	7,500		
E22	2543	s	f	mach	m8	m(8,8)	ME		58/49	
E23	3250		pc		#	complexe	GE			
E25	3211	s	f		hU	L/U	TGE		970	
E26	3194	s/p	cell (pc)	ilôts de fab	m8	m(8,T)	TGE	28,900	429	98.7
E27	2641	s	pc	dépts	mO	m(O,U)	ME		50	7.1
E28	3211	p	pc	mach	m8	m(T,T,8)	ME		70/54	
E30a	3062	s / p	pd	dépts	#	complexe	GE	5,770	130/75	21.5
E30b	3081	p	pc	dépts	O	O	PE	5,770	130/75	21.5
E33	1621	s	pc	mach	m8	m(I,8,I)	ME	6,800	49	4.7
E34	3381	s	pc		hH	H	TGE		545/240	117.1
E35	3058	s	pc	mach	h8	m(O,I)/8 tronqué	PE		- de 50	
E37	3194	s	cell (f)	ilôts de fab	#	complexe	TGE		1450/1025	
P01	2691	s	pd	dépts	hU	m(I,L)/U	PE		43/40	
P02	2641	s	pd	dépts	#	complexe	GE	4,500	154/128	

Tableau A9.1 Données compilées pour É.N.I. et École Polytechnique de Montréal
(suite)

	CTI	FAB.	TYPE	IMPLANTATION			TAILLE	DIM. (m ²)	#EMPL. TOTAL /EN PROD	CA (M\$)
P03	2641	s	pc	mach	8	8	PE	500	/20	
P04	3081	s	pc	mach	#	complexe	ME	1,800	55/35	
P05	3211	s	pd	dépts	#	complexe	TGE	22,000	1112/568	
P06	3199	s	pc	mach	hI	I/L	GE		/96 185/125	
P07	2494	s	pc	dépts	#	complexe	ME	1,700	/45	
P08	1072	s	pd	mach	mH	m(H,I,O)	PE	1,300	28/24	
P09	1111	s	pc/pd	dépts	m8	m(I,8)	ME		50/27 40/20	
P10	1998	s	pc	dépts	m8	m(L,8,H)	GE	6,500		
P11	2542	s	pc	mach	I	I	PE		42/29	
P12	3052	s	pc	dépts	m8	m(8,O)	GE	3,600	98/89	
P13	1991	s	cell (f)	cellules	mL	m(L,O)	PE	800	20/16	2.3
P15	2811	s	f	mach & dépts	m8	m(8,8,T)	PE	500	16/7	
P16	2819	s/p	pc	dépts	I	I	GE	2,500	150/110	10 @ 25
P18	1111	s	pd	dépts	I	I	GE	5,300	110/70 en 1994	
P19	3031	s	pc	dépts	I	I	ME	2,600	70-80 74/55	7
P20	2611	s	pc	dépts	mT	m(T,T)	ME	6,400	45/38	
P21	3321	s / p	pc	mach	hI	I/L	ME		70/45	7
P22	3931	s	pc	dépts	hI	I/L/T	ME	1,700	102/25	
P23	1611	s	pc	mach	hI	I complexe/ T	PE	1,200	43/40	
P24	2619	s	pc	mach	#	complexe	GE	4,200	102/90	
P25	2611	s	pc	mach	mO	m(O,I)	PE	1,900	/38 35/30	
P26	3741	s	pc	dépts	#	complexe	PE	2,100	- de 40 30/24	2.5
P27	3761	s	pc	dépts	m8	m(8,O,L)	PE		27/12	
P28	3932	s	pd	dépts	#	complexe	ME	1,200		
P29	3542	s	pc	mach	m8	m(8,O,I)	ME	1,300	/54 par quart 80/65	
P30	3971	s	pc	dépts	mO	m(O,I)	PE		30 22/16	
P31	2819	s	pc	mach	mT	m(T,8 tronqué)	PE	1,800	33 en 1996	
P32	2549	s	pd	mach	h8	H/8 tronqué	PE	1,900	12/10	
P33	3399	s	pc/pd (ass)	dépts	hH	H/m(T,L)	GE	2,900	105/70	

Si 1\$ = 3.8F

Tableau A9.2 Tableau croisé des CTI et des types d'implantation

INDUSTRIES		TYPES D'IMPLANTATION			
		par proc. op.	par produits	par familles	par cellules
10	Aliments	1	1		
11	Boissons <i>a)</i>	1	1		
16	Produits en matière plastique	3			
19	Produits textiles	1			1
24	Habillement	1			
25	Bois	1	1	1	
26	Meubles & articles d'ameublement	5	2		
28	Imprimerie, édition & ind. connexes	2		1	
30	Fabrication de produits en métal <i>c)</i>	9	2		
31	Machinerie	1			2
32	Matériel de transport	2	1	1	
33	Produits électriques & électroniques <i>b)</i>	3	1		
35	Produits minéraux non métalliques	1		1	
37	Chimiques	2			
39	Autres industries manufacturières	3	1		

où m : mixte

Total	36	10	4	3
Total*	36	10	4	3
	67.9%	18.9%	7.5%	5.7%

Notes : mixte => toujours par procédés et un autre type

Total* => a) Si on considère que toutes les étapes d'embouteillage, souvent en ligne de production, sont définies comme étant un procédé de conditionnement

b) Toutes les étapes d'assemblage en ligne, un seul procédé

c) Division en 2 entreprises : les poudres et les matrices

Tableau A9.3 Tableau croisé des caractéristiques et des tailles d'entreprises

DIMENSION	# EMPLOYÉS	CA	PE	ME	GE	TGE		
X				1	2		D	= 3
X	X		8	5	6	1	D & E	= 20
X		X					D & CA	= 0
	X		7	3	1	3	E	= 14
	X	X		2		2	E & CA	= 4
		X	1				CA	= 1
X	X	X	4	2	2	1	D & E & CA	= 9
				1	1		aucune	= 2
Total par taille :			20	14	12	7		
Total - catégorie Dimension :			12	8	10	2		
Total - catégorie # employés :			19	12	9	7		
Total - catégorie CA :			5	4	2	3		
Total - aucune catégorie :				1	1			

Tableau A9.4 Nombre de caractéristiques par taille d'entreprises

		NOMBRE DE CARACTÉRISTIQUES			
		3	2	1	AUCUNE
PE	38%	4	8	8	
ME	26%	2	7	4	1
GE	23%	2	6	3	1
TGE	13%	1	3	3	

Tableau A9.5 Formes de réseau de couloirs pour les entreprises de notre échantillon, réseaux bouclés

par processus opératoires	complexe	m8	mO	h8	8	0
PE						
ME						
GR						

Tableau A9.5 Formes de réseau de couloirs pour les entreprises de notre échantillon, réseaux bouclés (suite)


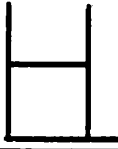






















par produits	complexe	m8	m0	h8	8	0
PE						
ME						
GE						
TGE						
par familles de produits						
PE						
ME						
TGE						

Tableau A9.6 Formes de réseau de couloirs pour les entreprises de notre échantillon, réseaux ouverts

	ml	ml	hu	hl	ml	l
par processus opératoires						
PE						
ME						
GE						
TGE						
par produits						
PE						
GE						
TGE						
par familles de produits						
par cellules						

Tableau A9.7 Formes de réseau de couloirs pour les entreprises associées au CTI-30

		Réseaux bouclés					Réseaux ouverts		
		complexe	m8	mO	h8	O	mL	I	
par processus opératoires	PE				 ** E35	 * E09-E30b	 E11		
	ME	 * P04							 P19
	GE		 P12	 E17					
	TGE								 E04
par produits	GE	 E30a							
	TGE								 E02